

Uluslararası
Savunma Sanayii
Sempozyumu ve Sergisi'25

International
Defense Industry
Symposium and Exhibition'25

Savunma Sanayii'nde; Akademik Çalışmalar Işığında Teknoloji & İnovasyon

BİLDİRİLER KİTABI

www.savunmasanyisempozyumu.org

ULUSLARARASI SAVUNMA SANAYİİ SEMPOZYUMU VE SERGİSİ'25

BİLDİRİLER KİTABI

YAYINA HAZIRLAYAN
Sedanur DEMİRBALAT

16 - 18 Ekim 2025
KAYSERİ

KATKILARIYLA

MİLLİ SAVUNMA BAKANLIĞI
CUMHURBAŞKANLIĞI SAVUNMA SANAYİİ BAŞKANLIĞI
KAYSERİ VALİLİĞİ
KAYSERİ BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
KIRŞEHİR BELEDİYESİ
KOCASİNAN BELEDİYESİ
MELİKGAZİ BELEDİYESİ
TALAS BELEDİYESİ
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
ABDULLAH GÜL ÜNİVERSİTESİ
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
KAYSERİ TİCARET ODASI
KAYSERİ SANAYİ ODASI
TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI KAYSERİ ŞUBESİ
TÜRK HARB-İŞ SENDİKASI
KOSGEB
ORAN KALKINMA AJANSI
KAYSERİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ
MİMARSİNAN ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ
İNCESU ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ
KAYSERİ TEKNOPARK
TÜRK STANDARTLARI ENSTİTÜSÜ (TSE)
MAKİNE VE KİMYA ENDÜSTRİSİ (MKE)
TUSAŞ-TÜRK HAVACILIK VE UZAY SANAYİİ A.Ş.
ASPİLSAN ENERJİ A.Ş.
ULAK HABERLEŞME A.Ş.
SAHA İSTANBUL
SASAD
AİRBUS
FORMAL ALÜMİNYUM SAN. VE TİC. A.Ş.
KAYTECH HAVACILIK ANONİM ŞİRKETİ
TÜRKTEK HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ
GPS MAKİNA MÜHENDİSLİK
KAYTEN TEKNOLOJİ
WUPSOFT TECHNOLOGY
ASKON ANADOLU ASLANLARI İŞADAMLARI DERNEĞİ KAYSERİ
İNOVDER | İNOVATİF İŞ İNSANLARI DERNEĞİ
ODAK EĞİTİM VE DANIŞMANLIK

DESTEKLERİYLE

KUTAY SAVUNMA (Ana Sponsor)
BATARYASAN (Yıldız Sponosor)
ASFAT (Platin Sponsor)
ÖZREELS (Altın Sponsor)
ASELSAN (Gümüş Sponsor)
ANKA BİNA YÖNETİMİ (Bronz Sponsor)
FERRE (Bronz Sponsor)
FORD ÜNALLAR (Bronz Sponsor)
GÖKKUŞAĞI (Bronz Sponsor)
KİM TEKNOLOJİ (Bronz Sponsor)
ROKETSAN (Bronz Sponsor)

SEMPOZYUM PROGRAMI

16 EKİM 2025 PERŞEMBE - 1. GÜN
ODİTORYUM SALON

09:00 - 10.00 KAYIT
10.00 - 11.00 AÇILIŞ KONUŞMALARI

- MMO Kayseri Şube Başkanı
  Süleyman VAROL
- Erciyes Üniversitesi Rekörü
  Prof. Dr. Fatih ALTUN
- Kayseri Büyükşehir Belediye Başkanı
  Dr. Memduh BÜYÜKKILIÇ
- Kayseri Valisi
  Gökmen ÇİÇEK
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanı
  Prof. Dr. Haluk GÖRGÜN (teşrifleri halinde)
- T.C. Milli Savunma Bakanı
  Yaşar GÜLER (teşrifleri halinde)

AÇILIŞ PANELİ ODİTORYUM SALON
11.00

Konu: Savunma Sanayiinde Sürdürülebilirlik

- Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ (MSB - ASFAT A.Ş. Genel Müdürü)

ÇAĞRILI KONUŞMACILAR 1. PANELİ
ODİTORYUM SALON / 11:30 - 13.00

Konu: Savunma Sanayi Lokomotifleri

Moderatör : Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR

- Dr. Tanyel ÇAKMAK (TUSAŞ A.Ş. Milli Muharip Uçak Teknoloji Geliştirme Yöneticisi)
- Bahadır GÜLTEKİN (AIRBUS Türkiye İş Geliştirme Direktörü)
- Prof. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR (ASPİLSAN A.Ş. Genel Müdürü)
- Mehmet Anıl ÜNAL (ROKETSAN A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı)
- Dr. Murat ASLAN (ASELSAN A.Ş. Genel Müdür Yardımcısı)

Öğle Yemeği 13.00 - 14.00

ÇAĞRILI KONUŞMACILAR 2. PANELİ
ODİTORYUM SALON / 14.00 - 15.30

Konu: Global Çerçevede Savunma Sanayi

Moderatör : Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

- Prof. J. N.REDDY (Texas A&M University)
- Prof. Erasmo CARRERA (Politecnico di Torino)
- Asist. Prof. Riccardo AUGELLO (Politecnico di Torino)
- Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK (Eskişehir Teknik Üniversitesi)

15.30 - 16.00 ARA

ÇAĞRILI KONUŞMACILAR 3. PANELİ
ODİTORYUM SALON / 16.00- 17.00

Konu: Siber Güvenlik

Moderatör : Prof. Dr. Mustafa ALKAN

- Prof. Dr. Mustafa ALKAN (SİBER GÜVENLİK AKADEMİ Yönetim Kurulu Başkanı)
- Ali AKÇAY (ULAK HABERLEŞME A.Ş. Ağ Altyapıları Müdürü)
- Uygar Yasin AYDIN (NESİL TEKNOLOJİ A.Ş. Genel Müdürü)
- Ceylan BOZOĞULLARINDAN (NightVision Security - Siber Güvenlik Uzmanı)

17 EKİM 2025 CUMA - 2.GÜN
MALAZGİRT SALON

1. OTURUM 9.30 - 11.00
Moderatör : Prof. Dr. Afşın Alper CERİT

- HMX, RDX ve NTA Patlayıcılarının Deteksiyonu Üzerine Hesaplamalı Bir Çalışma
  Mehmet Erdem SÖZBİR (İstanbul Teknik Üni.)
- Project Schedulıng In The Defense Industry: A Case Study On Howıtzer Modernızatıon
  Samet KOÇAK (Başkent Üni. Ankara)
- A Generalızed Hıgher-Order Plate Theory For The Free Vıbratıon Analysıs Of Functıonally Graded Plates Usıng Mıxed Fınıte Elements
  Abdullah MÜSEVİTOĞLU (Karatay Üni. Konya)
- Experimental and Numerical Investigation of AISI 1040 Steel under Different Temperatures and Strain Rate
  Burak ÖZCAN (Gazi. Üni. Ankara)

11.00 - 11.30 ARA

ÇAĞRILI KONUŞMACILAR 4. PANELİ
ODİTORYUM SALON / 11.30 - 13.00

Konu: Savunma Sanayi İsterleri ve Kümelenme

Moderatör : Murat ÇİZGEL

- Murat ÇİZGEL (SSB Sanayileşme Daire Başkanı)
- Doç. Dr. Mahmut ALKAN (ASFAT A.Ş. Mühendislik Direktörü)
- Yılmaz GÜLDOĞAN (ALP HAVACILIK Koordinatörü, SASAD Yönetim Kurulu Üyesi)
- Murat SERT (KİM TEKNOLOJİ A.Ş. Genel Müdürü)

Öğle Yemeği 13.00 - 14.00

ÇAĞRILI KONUŞMACILAR 5. PANELİ
ODİTORYUM SALON / 14.00 - 15.30

Konu: Biyolojik Savunma Sistemleri

Moderatör : Dr. Öğr. Üyesi Halil ULUTABANCA

- Doç. Dr. Ömer AYDIN (Erciyes Üniversitesi)
- Dr. Öğr. Üyesi Ebru SAATÇİ (Erciyes Üniversitesi)
- Dr. Öğr. Üyesi İbrahim SÖZTUTMAZ (Erciyes Üniversitesi)

15.30 - 16.00 ARA

17 EKİM 2025 CUMA - 2.GÜN
MALAZGİRT SALON

2. OTURUM 16.00 - 17.30
Moderatör : Doç. Dr. Murat AYDIN

- Havacılık ve Savunma Malzemeleri için Yapay Zeka Destekli Yüzey İncelemesi
  Behiye ŞAHİN (Tarsus Üni. Mersin)
- Ateşli Silahlarda Nihai Ürün İçin Metal Eklemeli İmalat Parçalarının Kullanımı
  Yüksel GUNAR (Kalekalıp)
- Scrutinizing The Seawater Degradation Resistance Of Alternate And Similar İnterfaces İn Carbon-Basalt Hybrid Composites Using Acoustic Emission
  Numan ZAFAR (KimTeknoloji Kayseri)
- Kaza Kırımların Önlenmesine Yönelik Uygulanan Yapısal Analiz Yöntemleri
  Zekeriya KARADURMUŞ (Afoğlu Mühendislik)

17 EKİM 2025 CUMA - 2.GÜN
DUMLUPINAR SALON

1. OTURUM 9.30 - 11.00
Moderatör : Mazhar GÜNDOĞ

- Adaptıve Stochastıc Mechanısms For Target Detectıon In Random-Sızed Uav Swarms: Brıdgıng Decentralızatıon And Precısıon
  Uğur POLAT (Karatay Üni. Konya)
- Lityum İyon Pillerde Anot Aktif Madde Olarak Kullanabilme Potansiyeline Sahip MnCr204 Ün Sentezi ve Elektrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi
  Halil ŞAHAN (Erciyes Üni. Kayseri)
- Denizcilikte Kullanılan Halatlarda Süper Hidrofobik Kaplama Uygulamasının Ve Korozyon İle Triborozyon Direncine Etkisinin Araştırılması
  Kadriye ERCİYESOĞLU (Erciyes Üni. Kayseri)
- Boronizing Of İnner Surface Of Lıght Fırearm Barrel
  Sadun KARABIYIK (Karadeniz Tek. Üni.Trabzon)

11.00 - 11.30 ARA

SEMPOZYUM PROGRAMI

17 EKİM 2025 CUMA - 2.GÜN
DUMLUPINAR SALON

2. OTURUM 16.00 - 17.30
Moderatör : Doç. Dr. Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

- Dijital Haritalarda Konum Doğruluğunun Değerlendirilmesi: Google Maps, Yandex Maps Ve Atlas'ın Gnss Destekli Karşılaştırılması
  Ziya ÖNAL (Marmara Üni. İstanbul)
- Implementatıon Of Boost Converter-Based Maxımum Power Poınt Trackıng And Optımızatıon Algorıthms In Portable Photovoltaıc Systems For Mılıtary Applıcatıons
  Mustafa ŞEKER (Cumhuriyet Üni. Sivas)
- Next-Generatıon Landmıne Detectıon Systems: A Mını Revıew Of Emergıng Technologıes
  Ataberk KÖŞGER (Atlas Üni. İstanbul)

18 EKİM 2025 CUMARTESİ - 3.GÜN
MALAZGİRT SALON

1. OTURUM 9.30 - 11.00
Moderatör : Fikret ŞAYLAN

- Quantum Imagıng For Remote Sensıng And Defence: A Mını-Revıew On Challenges And Opportunıtıes
  Muhammed Faruk ŞAHİN (Atlas Üni. İstanbul)
- Trıangle Antenna Array Desıgn For Unmanned Vehıcle Technologıes
  Zafer YILDIRIM (Kayseri Üni. Kayseri)
- Sismik Ve Elektromanyetik Tehditlere Karşı Entegre Milli Savunma Kalkanı
  Merve Nilay ÜNLÜ (Sütçü İmam Üni.)
- Verimli Kanal Dikkatiyle Derin Kanal Yeniden Kalibrasyonunu Kullanan YOLO11 Varyantlarında Gelişmiş SAR Gemisi Tespiti
  Murat BAKIRCI (Tarsus Üni. Mersin)

11.00 - 11.30 ARA

2. OTURUM 11.30 - 13.00
Moderatör : Ali ALKAN

- Improving Airspace Security with YOLO11: A UAV Detection Framework for Defense Systems
  İrem BAYRAKTAR (Tarsus Üni. Mersin)
- Modern Tank Sistemlerinde Anti-Tank Tehditlerine Karşı Aktif Koruma Yaklaşımı Benzetimi
  Halil İbrahim DİNÇEL (Eskişehir Osmangazi Üni.)
- Akıllı Savunma Sistemleri Dikkat Artırılmış YOLOv11 Kullanarak SAR Tabanlı Uçak
  Murat BAKIRCI (Tarsus Üni. Mersin)
- Dna-Based Data Storage In Space Mıssıons: A Mını Revıew Of Current Approaches And Challenges
  Ayşenur İGİT (Atlas Üni. İstanbul)

Öğle Yemeği 13.00 - 14.00

3. OTURUM 14.00 - 15.30
Moderatör : Akif AKSOY

- Klasik Kontrol Yöntemlerinin Tek Serbestlik Dereceli Helikopter Deney Kiti Üzerinde Uygulanması ve Savunma Sanayisindeki Yeri
  Şükriye Nur GÜNGÖR (Erciyes Üni. Kayseri)
- Dikey Kalkış Esnasında Helikopter Rotorunun Hücum Açısı ve Pala Ucu Yapısının Aerodinamik Performansa Etkisinin İncelenmesi
  Şanlı KAYA (Erciyes Üni. Kayseri)
- Farklı Twist Açılarının Jet Motorların Kompresörlerinde Kullanılan NACA65 210 Airfoil Geometrisindeki Stall Durumlarına Etkisi
  Tülay Sude ÇETİNKAYA (Erciyes Üni. Kayseri)

18 EKİM 2025 CUMARTESİ - 3.GÜN
DUMLUPINAR SALON

1. OTURUM 9.30 - 11.00
Moderatör : Doç. Dr. Buğrahan ALABAŞ

- Monitoring Poisson's Ratio of Glass Fiber Reinforced Composites as Damage Index
  Çağatay YILMAZ (Abdullah Gül Üni. Kayseri)
- Soğutma Amaçlı Al-Cu Fonskiyonel Derecelendirilmiş Dairesel Kanatçık Üretimi
  İbrahim ŞAFAK (Kayseri Üni. Kayseri)
- Havacılıkta Kullanılan radar anten tasarımı ve optimizasyonu
  Recep ŞAHİN (Kayseri Üni. Kayseri)
- Yerli Kromit Cevherinden Alüminotermik Reaksiyonla Düşük Karbonlu Krom Üretimi
  Ali Rıza TÜRKMEN (Elmacı Madencilik A.Ş,)

11.00 - 11.30 ARA

2. OTURUM 11.30 - 13.00
Moderatör : Prof. Dr.Cem SİNANOĞLU

- Tapa/Mühimmat Statik Patlama Test Altyapısı
  Denizhan DEMİR (MKE A.Ş. ANKARA)
- Tapa Tasarım Ve Üretim Yetenekleri: 40 Mm Bombaatar Mühimmatı Tapa Sistemleri
  Melike KAYA (MKE A.Ş. ANKARA)
- Effects Of Heat Treatment Produced By Selective Laser Meltıng (Slm) On SS 316L
  Nazife Nur CENGİZ (Gazi Üni. Ankara)
- Elektronik Harp Alanında Karşı Tedbirlerin Kullanımı Ve Stratejik Savunma Yaklaşımları
  Sahure GEÇER (MKE A.Ş. ANKARA)

Öğle Yemeği 13.00 - 14.00

3. OTURUM 14.00 - 15.30
Moderatör : Prof. Dr.Fehmi NAİR

- Composıte Materıals Used In The Mc-21 Aırlıner
  Melih Cemal KUŞHAN (Osmangazi Üni. Eskişehir)
- Ara Katmana Yerleştirilmiş Mwcnt-Pan Nanofiberlerin Karbon/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Özeliklerine Etkisi
  Ahmet AVCI (Karatay Üni. Konya)
- Multiscale Modelling Of Randomly-Distributed-Nanomaterial-Based Nanocomposites With Interfacial Interactions
  Hilal GÜLŞEN (Kapadokya Üni. Nevşehir)
- Grafen Nanopartikül Katkılı Seramik/Kompozit Vücut Zırhının Tasarımı, Üretimi Ve Balistik Özelliklerinin İncelemesi
  Alaettin ÖZER (Yozgat Bozok Üni. Yozgat)

IDESE

Yukarıda bulunan karekodu okutarak web sitemiz üzerinden sempozyum programına online ulaşabilirsiniz.

SEMPOZYUM ONUR KURULU

Gökmen ÇİÇEK	Kayseri Valisi
Dr. Memduh BÜYÜKKILIÇ	Kayseri Büyükşehir Belediye Başkanı
Doç. Dr. Mustafa PALANCIOĞLU	Melikgazi Belediye Başkanı
Ahmet ÇOLAKBAYRAKDAR	Kocasinan Belediye Başkanı
Mustafa YALÇIN	Talas Belediye Başkanı
Prof. Dr. Fatih ALTUN	Erciyes Üniversitesi Rektörü
Prof. Dr. Kurtuluş KARAMUSTAFA	Kayseri Üniversitesi Rektörü
Prof. Dr. Ahmet Fazıl ÖZSOYLU	Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Rektörü
Prof. Dr. Cengiz YILMAZ	Abdullah Gül Üniversitesi Rektörü
Mehmet BÜYÜKSİMİTCİ	Kayseri Sanayi Odası Başkanı
Ömer GÜLSOY	Kayseri Ticaret Odası Başkanı
Mehmet YALÇIN	Kayseri OSB Başkanı
Lütfi ÇARŞIBAŞI	Mimarsinan OSB Başkanı
İrfan PÜSKÜLLÜ	İncesu OSB Başkanı

SEMPOZYUM DÜZENLEME KURULU

Süleyman VAROL	Makine Mühendisleri Odası
Ayşe YAKUT	Makine Mühendisleri Odası
Berrin ZIRHLI	Makine Mühendisleri Odası
Prof.Dr. Afşın Alper CERİT	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Buğrahan ALABAŞ	Erciyes Üniversitesi
Akif TAŞKIN	2. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü
Özgür ÖZDEMİR	2. Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü
Mehmet Fatih AYTULUN	2. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü
Mehmet KALYON	2. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü
Erhan AYDOĞAN	2. Hava Bakım Fabrika Müdürlüğü
Zekeriya KARADURMUŞ	Afoğlu Mühendislik
Naci KÜÇÜK	TUSAŞ
Mehmet Hakan ÇAKIL	DENER
İsmail KÜCEN	Erat Kablo
Özer KURTULUŞ	SERSİM
Cemil GÖZKENÇ	Ferre
Murat SERT	KİM Teknoloji
Nuh TOMBAK	TODEK Mühendislik
Özgür ÇAKICI	Elektrik Mühendisleri Odası
Hüseyin KAYA	Kimya Mühendisleri Odası

SEMPOZYUM BİLİM KURULU

Prof. Dr.Abdulkadir Bilişik	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Afşın Alper Cerit	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Ahmet Alper Öner	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Ahmet Can	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Ahmet Erkliğ	Gaziantep Üniversitesi
Prof. Dr.Ahmet Turan Özdemir	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Ali Pınarbaşı	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr.Aytekin Bağış	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Cem Sinanoğlu	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Celal Öztürk	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Çetin Karataş	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr.Ertan Buyruk	Cumhuriyet Üniversitesi
Prof. Dr.Fahrettin Öztürk	TEİ Yön. Krl. Bşk.
Prof. Dr.Fatih Altun	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Fehmi Nair	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Gamze Genç	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Gamze Süpüren Mengüç	Ege Üniversitesi
Prof. Dr.Gonca Özçelik	Ege Üniversitesi
Prof. Dr.Gültekin Yıldız	İstanbul Üniversitesi
rof. Dr.Halil İbrahim Acar	Cumhuriyet Üniversitesi
Prof. Dr.Hasan Yıldız	Ege Üniversitesi
Prof. Dr.Hüseyin Çimenoğlu	İTÜ
Prof. Dr.İbrahim Develi	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.İlke Türkmen	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.İlker Yılmaz	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Kerim Güney	Nuh Naci Yazgan Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet Baki Karamış	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Mehmet Doğan	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Mete Kalyoncu	Konya Teknik Üniversitesi
Prof. Dr.Metin Tanoğlu	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İYTE
Prof. Dr.Melih Cemal Kuşhan	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Prof. Dr. Munise Didem Demirbaş	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Barut	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Prof. Dr. Murat Dilmeç	Necmettin Erbakan Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa Serdar Genç	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Muhammed Bahattin Tanyolaç	Ege Üniversitesi
Prof. Dr.Mustafa Fener	Ankara Üniversitesi
Prof. Dr.Mustafa İlbaş	ASFAT Genel Müdürü
Prof. Dr.Mustafa Kemal Apalak	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Mustafa Serdar Önses	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Nesrin Kayataş Demir	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Nurettin Acır	Milli Savunma Üniversitesi
Prof. Dr.Okan Addemir	İTÜ
Prof. Dr.Ömer Galip Saraçoğlu	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Okan Karahan	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Recep Çalın	Kırıkkale Üniversitesi
Prof. Dr.Recep Ekici	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Recep Güneş	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. Sebahattin Ünalan	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Selahattin Orhan Akansu	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Serhat Karyeyen	Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Serkan Toros	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Prof. Dr.Şahin Yıldırım	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Veli Çelik	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Prof. Dr.Veysel Özceyhan	Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr.Yeliz Pekbey	Ege Üniversitesi
Prof. Dr.Yüksel Kaplan	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Prof. Dr.Zafer Evis	ODTÜ
Doç. Dr. Alb. Alpaslan Atmanlı	Milli Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Paşa Hekimoğlu	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi ,
Doç. Dr. Berat Barış Buldum	Mersin Üniversitesi
Doç. Dr. Buğrahan Alabaş	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Cem Boğa	Adana Alparslan Türkeş Üniversitesi
Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Erdem Çiftçi	Gazi Üniversitesi
Doç. Dr.Feyza Gürbüz	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Hamdi Taplak	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Kholoud Elmabruk	Sivas Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi
Doç. Dr.Mahmut Alkan	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Doç. Dr. Mehmet Bahadır Çetinkaya	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Mehmet Dördüncü	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İYTE
Doç. Dr. Mehmet Fatih Kaya	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Murat Aydın	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Murat Şahin	Milli Savunma Üniversitesi
Doç. Dr. Murat Taştan	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa Demirci	Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Nazım Babacan	Sivas Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi
Doç. Dr. Orhan Keklikcioğlu	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Osman Kahveci	Erciyes Üniversitesi
Doç Dr. Rıdvan Demir	Kayseri Üniversitesi
Doç. Dr.Selçuk Aslan	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Serkan Öztürk	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Semih Özden	Milli Savunma Üniversitesi
Doç. Dr.Soner Savaş	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Timuçin Emre Tabaru	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Doç. Dr. Umut Çalışkan	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr.Ümit Nazlı Temel	Cumhuriyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Özcan	Kapadokya Üni
Dr. Öğr. Üyesi Ali Suat Yıldız	Sivas Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Alime Aslı İlleez	Ege Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Bilge Kağan Dedetürk	Erciyes Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Çağlar Sevim	Niğde Ömer Halisdemir üni
Dr. Öğr. Üyesi Emre Yurtkuran	Sivas Bilim Ve Teknoloji Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Faruk Mert	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Hüsamettin Alperen Alabaş	Kapadokya Üni
Dr. Öğr. Üyesi Levent Şendoğdular	Erciyes Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Osman Kümük	İskenderun Teknik Üni
Dr. Öğr. Üyesi Sami Pekdemir	Erciyes Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Selda Topçu Şendoğdular	Erciyes Üniversitesi
Ahmet Altınay	Ankara core cell genel müdür

İÇİNDEKİLER

HMX, RDX VE NTA PATLAYICILARININ DETEKSIYONU ÜZERINE HESAPLAMALI BIR ÇALIŞMA
Mehmet Erdem SÖZBİR ……..... 1

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF AISI 1040 STEEL UNDER DIFFERENT TEMPERATURES AND STRAIN RATE
Burak ÖZCAN, Umut ÇALIŞKAN, Murat AYDIN, Ulvi ŞEKER……. 3

HAVACILIK VE SAVUNMA MALZEMELERİ İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ YÜZEY İNCELEMESİ: YOLOV11 TABANLI BİR YAKLAŞIM
Behiye ŞAHİN, Murat BAKIRCI……..…… 11

ATEŞLİ SİLAHLARDA NİHAİ ÜRÜN İÇİN METAL EKLEMELİ İMALAT PARÇALARININ KULLANIMI
Yüksel GÜNAR……..……... 21

SCRUTİNİZİNG THE SEAWATER DEGRADATİON RESİSTANCE OF ALTERNATE AND SİMİLAR İNTERFACES İN CARBON-BASALT HYBRİD COMPOSİTES USİNG ACOUSTİC EMİSSİON
Hafız Muhammad Numan ZAFAR, Fehmi NAİR..... 26

KAZA KIRIMLARIN ÖNLENMESİNE YÖNELİK UYGULANAN YAPISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ
Zekeriya KARADURMUŞ, Bayram KARADURMUŞ…… 43

RASTGELE BOYUTLU İHA SÜRÜLERİNDE HEDEF TESPİTİ İÇİN UYARLANABİLİR STOKASTİK MEKANİZMALAR: MERKEZİYETSİZLİK VE KESİNLİK ARASINDA BİR KÖPRÜ
Uğur POLAT, Ahmet AVCI, Ahmet Mete VURAL…… 56

LİTYUM İYON PİLLERDE ANOT AKTİF MADDE OLARAK KULLANILABİLME POTANSİYELİNE SAHİP $MnCr_2O_4$ ÜN SENTEZİ VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Zeynep DURMUŞ, Kübra TEKEL, Ali Rıza TÜRKMEN, Kültiğin Çağrı BARBAS,
Halil ŞAHAN……. 67

DENİZCİLİKTE KULLANILAN HALATLARDA SÜPERHİDROFOBİK KAPLAMA UYGULAMASININ VE KOROZYON İLE TRİBOKOROZYON DİRENCİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
Prof. Dr. Afşın Alper CERİT, Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nazlı ÖZSOLAK, Prof. Dr. Erkan YILMAZ, Kadriye ERCİYESLİOĞLU BATIGÜN……..…… 83

BORONIZING OF INNER SURFACE OF LIGHT FIREARM BARREL
Sadun KARABIYIK, Yasin ALEMDAĞ, Furkan ALPTEKİN, Gençağa PÜRÇEK…… 91

EVALUATING POSITIONAL ACCURACY IN DIGITAL MAPS: GNSS-BASED COMPARISON OF GOOGLE MAPS, YANDEX MAPS AND ATLAS
Ziya ÖNAL, İsmail İSTAY, Serkan AYDIN…… 100

IMPLEMENTATION OF BOOST CONVERTER-BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKING AND OPTIMIZATION ALGORITHMS IN PORTABLE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR MILITARY APPLICATIONS
Mustafa ŞEKER, Emre ÜNSAL, Ahmet AKSÖZ, Saadin OYUCU……..…… 115

NEXT-GENERATION LANDMINE DETECTION SYSTEMS: A MINI REVIEW OF EMERGING TECHNOLOGIES
Ataberk KÖŞGER, Arda GÜNEŞ, Enes ALTINDİREK, İsmail Buğra KURU, Muhammed Faruk ŞAHİN…… 127

QUANTUM IMAGING FOR REMOTE SENSING AND DEFENCE: A MINI-REVIEW ON CHALLENGES AND OPPORTUNITIES
Muhammed Faruk ŞAHİN, Emine US, Fatma Betül OKUR, Ahmet ÖZCAN…….. 139

TRIANGLE ANTENNA ARRAY DESIGN FOR UNMANNED VEHICLE TECHNOLOGIES
Zafer YILDIRIM, Ali DURMUŞ…… 153

VERİMLİ KANAL DİKKATİYLE DERİN KANAL YENİDEN KALİBRASYONU KULLANILARAK YOLOV11 VARYANTLARINDA GELİŞMİŞ SAR GEMİ TESPİTİ
Murat BAKIRCI, İrem BAYRAKTAR……... 154

YOLOV11 İLE HAVA SAHASI GÜVENLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ: SAVUNMA SİSTEMLERİ İÇİN BİR İHA ALGILAMA ÇERÇEVESİ
Murat BAKIRCI, İrem BAYRAKTAR……... 164

MODERN TANK SİSTEMLERİNDE ANTİ-TANK TEHDİTLERİNE KARŞI AKTİF KORUMA YAKLAŞIMI BENZETİMİ
Halil İbrahim DİNÇEL, Toygun KİP, Işıl YAZAR……..…….173

AKILLI SAVUNMA SİSTEMLERİ: DİKKAT ARTIRILMIŞ YOLOV11 KULLANARAK SAR TABANLI UÇAK ALGILAMANIN GELİŞTİRİLMESİ
Murat BAKIRCI, Behiye ŞAHİN……...……..182

DNA-BASED DATA STORAGE IN SPACE MISSIONS: A MINI REVIEW OF CURRENT APPROACHES AND CHALLENGES
Beyza ÖZTÜRK, Ayşenur İGİT, Aylin KAYA, Zeynep Tuğsem ÇAMLICA, Selen ARICI, Muhammed Faruk ŞAHİN……...…….192

KLASIK KONTROL YÖNTEMLERININ TEK SERBESTLIK DERECELI HELIKOPTER DENEY KITI ÜZERINDE UYGULANMASI VE SAVUNMA SANAYISINDEKI YERI
Yiğit Emre GÖKTAŞ, Leyla ÖZBEK, Şükriye Nur GÜNGÖR……..……205

DIKEY KALKIŞ ESNASINDA HELIKOPTER ROTORUNUN HÜCUM AÇISININ AERODINAMIK PERFORMANSA ETKISININ İNCELENMESI
Merve TEMİZ, Şanlı KAYA, Yusuf Gökhan ÜNLÜ, Buğrahan ALABAŞ……...……...217

FARKLI TWIST AÇILARININ JET MOTORLARIN KOMPRESÖRLERINDE KULLANILAN NACA65 210 AIRFOIL GEOMETRISINDEKI STALL DURUMLARINA ETKISI
Tülay Sude ÇETİNKAYA, Beyza Nur ASLAN, Eylül ERDOĞAN, Buğrahan ALABAŞ……..226

MONITORING POISSON'S RATIO OF GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES AS DAMAGE INDEX
Çağatay YILMAZ, Mehmet YILDIZ…….……..234

SOĞUTMA AMAÇLI AL-CU FONSKİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ DAİRESEL KANATÇIK ÜRETİMİ
İbrahim ŞAFAK, Recep GÜNEŞ, Fehmi NAİR……..…….240

MKE INC. FUZE/AMMUNITION STATIC EXPLOSION TEST INFRASTRUCTURE
Denizhan DEMİR, Atakan BEKTAŞ, Göksel KARA, Faruk ULAMIŞ, Serhad YILDIZ……..….257

MKE INC. FUZE DESIGN AND PRODUCTION CAPABILITIES:40 MM GRENADE LAUNCHER AMMUNITION FUZE SYSTEMS
Melike KAYA, Selim GEMİCİ, Atakan BEKTAŞ, Denizhan DEMİR, Göksel KARA, Faruk ULAMIŞ, Serhad YILDIZ…….....264

SEÇICI LAZER ERGITME YÖNTEMIYLE ÜRETILEN SS316L'YE UYGULANAN ISIL İŞLEMIN ETKISI
Nazife Nur CENGİZ, Sachin SALUNKHE, Gökhan KÜÇÜKTÜRK……...……..268

APPLICATION OF COUNTERMEASURES IN ELECTRONIC WARFARE AND STRATEGIC DEFENSE METHODS
Sahure GEÇER, Uğur GENÇALP, Burak CENGİZ, Tolga Orçun ŞENGÖZ, Yunus Emre KURUM, Ezgi Çiğdem ARPACI, Elvan GÖKSU, Gözde TEKİN, Sevil ERTEKİN, Selim GEMİCİ, Fehim OSMANOĞLU……..…281

COMPOSITE MATERIALS USED IN THE MC-21 AIRLINER
Melih Cemal KUSHAN……288

MULTISCALE MODELLING OF RANDOMLY-DISTRIBUTED- NANOMATERIAL-BASED NANOCOMPOSITES WITH INTERFACIAL INTERACTIONS
Hilal GÜLŞEN, Umut ÇALIŞKAN…….295

GRAFEN NANOPARTİKÜL KATKILI SERAMİK/KOMPOZİT VÜCUT ZIRHININ TASARIMI, ÜRETİMİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Dr. Öğr. Üyesi Halil Burak MUTU, Prof. Dr. Alaettin ÖZER…….….303

YERLİ KROMİT CEVHERİNDEN ALÜMİNOTERMİK REAKSİYONLA DÜŞÜK KARBONLU KROM ÜRETİMİ
Halil ŞAHAN, Ali Rıza TÜRKMEN, Ömer DAYI……..313

LİTYUM İYON PİLLERDE ANOT AKTİF MADDE OLARAK KULLANILABİLME POTANSİYELİNE SAHİP MnCr2O4 ÜN SENTEZİ VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Zeynep DURMUŞ, Kübra TEKEL, Ali Rıza TÜRKMEN, Kültiğin Çağrı BARBAS, Halil ŞAHAN……334

HMX, RDX VE NTA PATLAYICILARININ DETEKSIYONU ÜZERINE HESAPLAMALI BIR ÇALIŞMA

Mehmet Erdem SÖZBİR

Istanbul Tecnical University, Faculty of Science and Letters, Department of Chemistry, Istanbul -Türkiye ,ORCID: 0009-0000-9299-7562

Berkay SÜTAY

Istanbul Technical University, Faculty of Science and Letters, Department of Chemistry, Istanbul - Türkiye, (Corresponding Author) ORCID: 0000-0003-4912-199X

Abstract

In this study, a previously developed preconcentration-based methodology was tested on various types of explosives, with a particular focus on reducing the amount of material required for detection. The proposed approach aims to minimize human intervention while ensuring high detection ratio using smaller sample quantities. Its intended areas of application range from open and hazardous environments such as former minefields to enclosed and crowded public spaces including bus, train and airport terminals. Theoretical analyses were conducted using computational chemistry methods. The study focused on RDX (1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazine) HMX (1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazocane), and NTA (Nitrotriazolone) which are difficult to detect due to their low vapor pressures. HMX and RDX are high-energy compounds used not only in military mines and munitions systems but also in certain industrial applications. NTA, on the other hand, is a highly stable explosive both thermally and chemically, and is widely utilized not only in mines but also in large-caliber munitions. Therefore, the detection of these molecules addresses current security challenges and also provides foresight into potential future threat scenarios. However, the significant spectral similarities in the absorption profiles of these explosives pose selectivity challenges in analytical processes, necessitating more sensitive detection approaches. The theoretical methodology used in this work showed the proper applicance of the present technique to be suitable for implementation in densely populated, enclosed public spaces such as buses, trains, subways and airport terminals. For this purpose, aflas was employed as the polymer substrate, while Super Yellow was used as the sensor material. The molecular complexes formed between these structures and the target explosive molecules were modeled by using Density Functional Theory (DFT). The interaction energies and theoretical fluorescence spectra were calculated at the B3LYP/6-31G(d,p) level of theory. The computational sources used in this work were supplied by ITU National High-Performance Computing Center (UHeM). The results offered significant time and cost advantages in the pre-experimental phase of the whole process. Furthermore, this study provides a theoretical envisioning for the development of highly sensitive and selective sensor systems, paving the way for innovative security solutions.

Keywords: HMX, RDX, NTA, computational chemistry, density functional theory, sensor technology.

Özet

Bu çalışmada, daha önce geliştirilen bir prekonsantrasyon temelli metodoloji farklı patlayıcı türleri üzerinde test edilmiş ve özellikle tespit için gereken madde miktarını azaltma potansiyeli araştırılmıştır. Geliştirilen yöntem, hem insan müdahalesini en aza indirmeyi hem de patlayıcı tespiti süreçlerinde daha düşük örnek miktarıyla yüksek doğruluk sağlamayı hedeflemektedir. Uygulama alanı olarak, eski savaş alanları gibi açık tehlikeli bölgelerden, otobüs, tren ve havaalanı terminalleri gibi güvenlik açısından kritik kapalı alanlara kadar geniş bir yelpaze öngörülmektedir. Bu kapsamda, kuramsal düzeyde yürütülen analizlerde hesaplamalı kimya yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmada düşük buhar basınçları nedeniyle tespiti güç olan RDX (1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinan), HMX (1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazokan) ve NTA (Nitrotriazolon) moleküllerinin deteksiyonu hedeflenmiştir. HMX ve RDX, askeri mayınlar ve mühimmat sistemlerinin yanı sıra bazı endüstriyel uygulamalarda da kullanılan yüksek enerjili bileşiklerdir. NTA ise yüksek termal ve kimyasal dayanıklılığa sahip bir patlayıcı olup yalnızca mayınlarda değil, aynı zamanda yüksek kalibreli mühimmatlarda da yaygın şekilde kullanılan bir bileşendir. Bu nedenle, söz konusu moleküllerin tespiti mevcut güvenlik ihtiyaçlarına ve bu teknolojinin geleceğine de hazırlık niteliği taşımaktadır. Ancak bu patlayıcıların absorpsiyon spektrumlarının büyük ölçüde benzerlik göstermesi, analiz sürecinde seçicilik açısından önemli zorluklar yaratmakta ve daha hassas deteksiyon yaklaşımlarını gerekli kılmaktadır. Geliştirilen kuramsal yaklaşım mevcut deteksiyon tekniğinin otobüs, tren, metro ve havaalanı terminalleri gibi kalabalık ve kapalı kamusal alanlarda uygulanabilir nitelikte olduğunu göstermiştir. Bu doğrultuda polimer substrat olarak aflas, sensör materyali olarak ise Super Yellow kimyasalı kullanılmıştır. Bu yapıların hedef patlayıcı moleküllerle oluşturdukları moleküler kompleksler, yoğunluk fonksiyoneli kuramı (DFT) kapsamında modellenmiş, etkileşim enerjileri ve kuramsal floresans spektrumları B3LYP/6-31G(d,p) düzeyinde hesaplanmıştır. Hesaplamalar İTÜ Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi (UHeM) kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deney öncesi çalışmalarda zaman ve maliyet açısından ciddi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca bu çalışma, gelecekte geliştirilecek hassas ve seçici sensör sistemlerine kuramsal düzeyde katkı sağlayarak, yenilikçi güvenlik çözümlerinin önünü açmaktadır.

Anahtar Kelimeler: patlayıcı, HMX, RDX, NTA, hesaplamalı kimya, yoğunluk fonksiyoneli kuramı, sensör teknolojisi

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF AISI 1040 STEEL UNDER DIFFERENT TEMPERATURES AND STRAIN RATE

Burak ÖZCAN

Dr, Advanced Composite Materials Research Group, Erciyes University, Kayseri -Türkiye
ozcan.burak@outlook.com (Corresponding Author) ORCID: 0000-0001-9914-5477

Umut ÇALIŞKAN

Doç. Dr, Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri - Türkiye
ucaliskan@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8043-2799

Murat AYDIN

Doç. Dr, Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri - Türkiye
aydın@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3713-3029

Ulvi ŞEKER

Prof. Dr, Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, Kayseri - Türkiye
useker@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6455-6858

Abstract

In this study, quasi-static tensile tests were carried out at room conditions and temperatures of 300, 500 and 700°C to investigate the mechanical behaviour of AISI 1040 medium carbon steel material. Split Hopkinson pressure bar tests were carried out at four different strain rates up to a maximum strain rate of approximately 4400/s at four different strain rates to investigate the behaviour at high strain rates. Johnson-Cook (JC) material parameters (A, B, n, C, m) were calculated based on the data obtained in the tests. The calculated JC material and damage parameters were defined in the library of Ansys finite element software and the actual tensile test was modelled in the computer environment by entering the relevant boundary conditions using the "Explicit Dynamics" module. The tensile tests modelled in the virtual environment were compared with the actual test data. When the results of the tensile tests were compared with the results of the tests performed in the virtual environment, it was seen that the results were very similar and the maximum difference was determined to be below 10%.

Keywords: FEA, Johnson Cook, Split Hopkinson, AISI 1040, High Strain Rate, High Temperature.

Introduction

Medium-carbon steels are widely used in the machinery manufacturing and automotive industries due to their balanced structure between mechanical properties and cost. AISI 1040 steel, which belongs to this group, is preferred in many applications such as shafts, gears, fasteners, and various structural parts (Satheesh Kumar et al., 2017; Prince et al., 2020). The mechanical behaviour of steel varies significantly depending on its microstructure, the heat treatment applied, the strain rate, and the temperature. To accurately predict these changes under dynamic loading, the use of reliable material models in finite element analyses is essential. At this point, the Johnson–Cook (JC) model, which can define strain hardening, rate sensitivity, and thermal softening in the same equation, is widely preferred.

Numerous experimental and numerical studies have been conducted on AISI 1040 steel in the literature, focusing on different aspects. On the machining side, Satheesh Kumar et al. (2017) reported that vegetable oil-based cutting fluids and EP additives reduced cutting forces and improved surface quality in turning operations. Prince et al. (2020) improved tribological properties by applying a Ti–6Al–4V coating to the surface. Singh et al. (2019) investigated fretting wear behaviour and demonstrated that changes in the sliding regime play a critical role in crack initiation. In heat treatment studies, Aakarsh et al. (2023) reported the effects of different cooling media on mechanical properties and corrosion resistance, noting that the martensitic structure provides high hardness but reduces corrosion resistance. Abid et al. (2023) succeeded in increasing impact toughness through biomimetic thermo-mechanical processing, while Prabhu et al. (2019) demonstrated that shot peening extends fatigue life.

Noteworthy studies also exist in the field of finite element modelling. Gök et al. (2013) validated the forces obtained using FEM in drilling operations by comparing them with experimental data, while Yardımeden and Turan (2015) examined the effect of cutting parameters on turning forces and emphasised that feed rate is the most dominant factor. Bosire et al. (2024) developed a 3D FEM model for turning AISI 1040, presented the Johnson–Cook parameters in tabular form (A = 375 MPa, B = 383 MPa, n = 0.23, C = 0.07, m = 0.99) and noted a high simulation–experiment agreement. However, it was not explained how these parameters were obtained or what source they were based on. Uğur (2019) and Uğur and Kazan (2020) provided the JC parameters for AISI 1040 as A = 553. 1 MPa, B = 600.8 MPa, n = 0.234, C = 0.013, m = 1 for AISI 1040 and attributed them to Shrot & Bäker (2012). However, the relevant study only contains parameters for AISI 52100 steel, and the values given do not match these parameters. Therefore, the source of the values used in the aforementioned publications is unclear.

In general, the machinability, wear, fatigue and heat treatment behaviour of AISI 1040 has been extensively studied in the literature. However, there is a significant lack of direct calibration of Johnson–Cook model parameters using experimental data specific to this steel. Many researchers have adapted JC parameters belonging to similar but different steels, such as AISI 1045 or AISI 52100, which has created uncertainty in modelling studies. Therefore, directly determining the parameters representing the behaviour of AISI 1040 steel at high temperatures and high strain rates using experimental methods is critical to filling an important gap in the literature.

Materials and Methods

AISI-1040 steel material was used in the study. Spectral analysis was performed to determine the ratio of alloying elements in this steel material, and the alloy ratios are given in Table 1. Technical drawings of the specimens used in the tensile and Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests are given in Figure 1.

Table 1. Nominal composition of AISI 1040 Steel %

C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni
0.401	0.252	0.751	0.0175	1.04	0.143	0.165

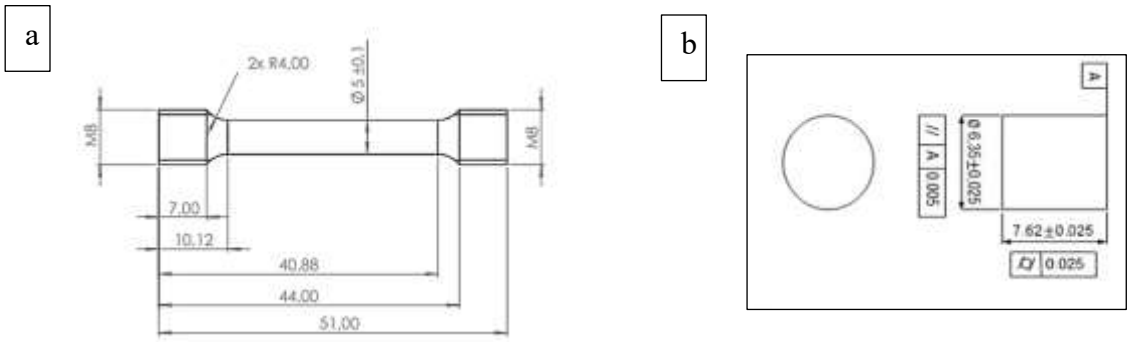


Figure 1. Geometry Dimensions of Tensile(a) and SHPB(b) Test Specimen

Tensile tests were conducted at room temperature using a Zwick/Roell Z600 universal testing machine in accordance with TS EN ISO 6892-1: Method B, with a strain rate of 0.0067/s. To ensure repeatability, at least three tests were performed for each test specimen.

Dynamic compression tests were conducted at four different strain rates and under ambient conditions. The tests were performed using a Rel brand Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test setup. The strain rates were not the same for each sample but were approximately 912, 1773, 3232, and 4393/s. To ensure the repeatability of the tests, at least three tests were performed at each strain rate. A schematic representation of the SHPB test setup is shown in Figure 2.

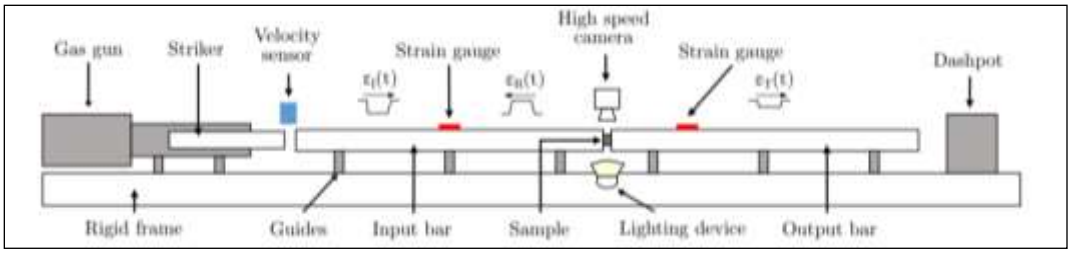


Figure 2. The schematic of SHPB test.

High-temperature tensile tests were conducted at temperatures of 300°, 500° and 700°C using an INSTRON brand 8852 model servo testing machine. To ensure the repeatability of the tests, at least three tests were performed for each test sample.

Within the scope of the study, the Ansys Workbench Explicit/Autodyn package programme was used as finite element software. The JC material and damage model parameters obtained from the tests were defined in the software library and assigned to the relevant materials. The solid model and finite element model of the flat tensile test specimen used in the quasi-static tensile test analyses performed using finite element analysis are shown in Figure 3. The element type used in the mesh model is a linear hexahedral quadrilateral element, with 6,164 elements and 7,412 nodes. As a boundary condition, one end of the test specimen was fixed, and the other end was pulled at a constant speed of 0.02 mm/s.

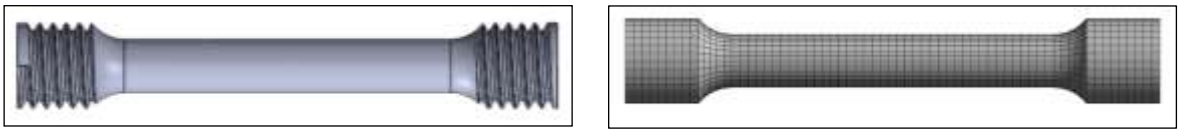


Figure 3. Tensile test specimen and FE mesh model.

The finite element model of the cylindrical test specimen used in SHPB test analyses, including the incident and transmitted rods, is shown in Figure 4. The element type used in the mesh model is a linear hexahedral quadrilateral element, with 4,920 elements and 4,161 nodes. The length of the striker bar is 300 mm. As boundary conditions, only axial movement freedoms are given for the striker, incident, and transmitted bars. The striker impact velocity achieved in the tests is given as the initial condition.

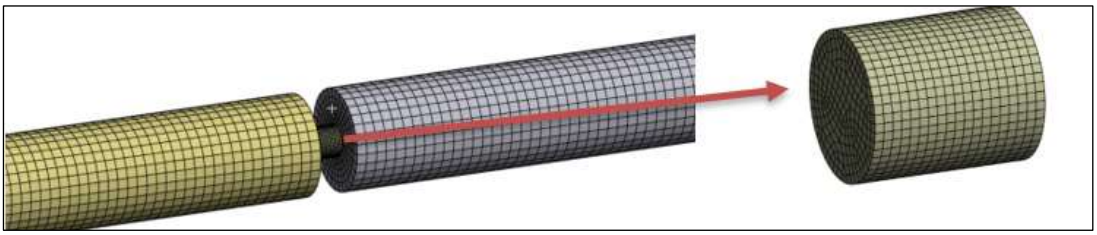


Figure 4. Finite element model of the SHPB setup including striker, incident and transmitted bars

Findings and Discussion

Figure 5 shows a microstructure photograph of AISI 1040 steel. The microstructure of this material has a classic two-phase structure consisting of ferrite (light areas) and pearlite colonies (dark areas). The 50 μm scale image in Figure 5(a) reveals the homogeneous distribution of the phases, with no visible banding or carbide network; at this magnification, the ferrite phase matrix is clearly visible, while the pearlite columns appear as dark areas. The 20 μm scale image obtained at higher magnification (Figure 5(b)) partially reveals the lamellar texture in the pearlite columns, with the lamellar structure formed by the sequential arrangement of ferrite and cementite platelets oriented in different directions. The ferrite grains have a polygonal morphology and provide continuity between the pearlite regions, thus reflecting the typical ferrite–pearlite texture expected in medium-carbon steels after normalisation or hot rolling. This texture can be considered an indicator of balanced behaviour between strength and ductility in terms of mechanical properties.

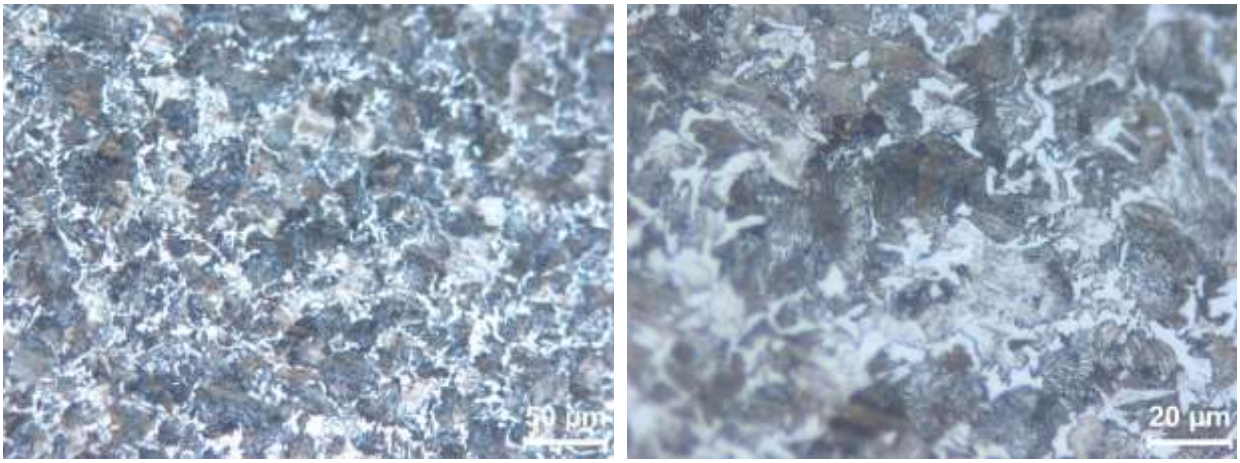


Figure 5. Microstructure of AISI 1040.

Figure 6(a) shows the actual stress–strain curves obtained for AISI 1040 steel at different temperatures. At room temperature (27 °C), the material exhibits a strength of approximately 950 MPa. A significant stress hardening is observed after yielding. At 300 °C, a slight decrease in strength occurred, but the material still exhibited high tensile strength and significant work hardening. At 500 °C, there was a significant decrease in strength, the tensile strength dropped to approximately 320 MPa, and the hardening behaviour weakened. At 700 °C, the material exhibited soft deformation with low tensile strength (~100 MPa) and almost no post-yield hardening. The results obtained reveal that the yield strength and post-yield hardening capacity of AISI 1040 steel decrease significantly as the temperature increases.

Figure 6(b) shows the actual stress–strain curves obtained for AISI 1040 steel at different strain rates. At low strain rates (912 s^{-1}), the yield stress started at approximately 650 MPa and exhibited a limited hardening tendency after yielding. At speeds of 1773 s^{-1} and 3232 s^{-1}, the strength increased significantly, the yield stress rose to the range of 800–850 MPa, and high strength was maintained up to approximately 0.15 plastic strain. At the highest speed (4393 s^{-1}), the material was damaged and was not used in determining the JC parameters. The results reveal a significant improvement in the yield stress and work hardening capacity of the material with increasing strain rate, indicating that AISI 1040 steel exhibits a pronounced strain rate sensitivity.

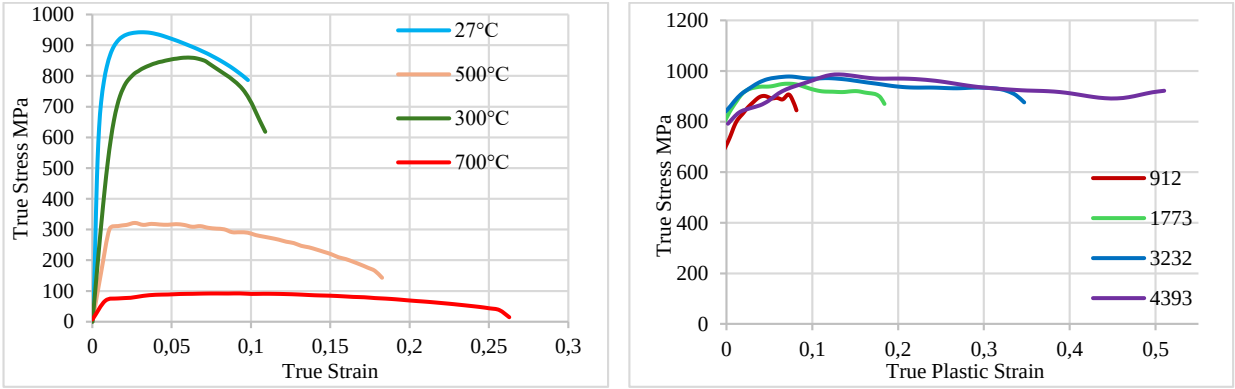


Figure 6. True stress–strain curves of AISI 1040 steel obtained at (a) different temperatures and (b) different strain rates.

Figure 7 presents linear regression analyses for determining the Johnson–Cook model parameters of AISI 1040 steel. The top left graph shows the relationship between Ln (Sigma-A) and Ln((ϵ)), providing the slope coefficient n and achieving an acceptable fit with $R^2 = 0.8023$. The graph in the upper right shows the relationship between the ratio of stress to the term $A + B\epsilon^n$ and $\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^0}\right)$. The C coefficient obtained from the slope is defined with a very low value and provides high accuracy with R^2=0.9969. The graph at the bottom represents temperature dependence, where the m parameter is determined through the linear relationship between the normalised stress ratio and T* ($R^2 = 0.7719$). Overall, the regression analyses provided adequate accuracy in determining the Johnson–Cook model coefficients, with a high correlation achieved particularly for the velocity sensitivity parameter.

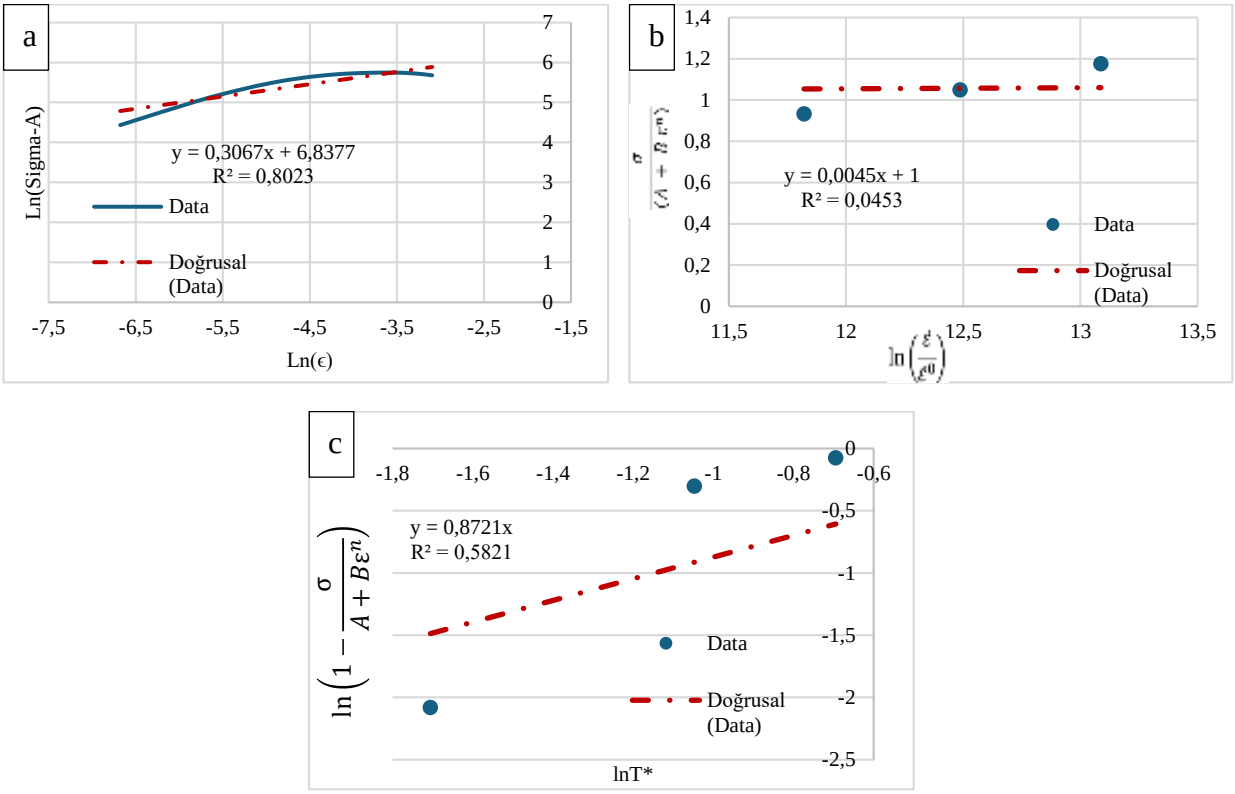


Figure 7. $\ln(\sigma - A)$ and $\ln \epsilon$(a), relationship between strain rate and normalized Stress(b), relationship between $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{A+B\varepsilon^n}\right)$ and $\ln T^*$(c)

The JC parameters obtained as a result of the experiments conducted to obtain the JC parameters are given in Table 2.

Table 2. JC material model parameters.

A(MPa)	B(MPa)	n	C	m
630	932	0.3067	0.0045	0.8721

When comparing the tensile test results given in Figure 8 with the finite element analysis (FEA), it can be seen that the two curves are generally consistent. In the elastic region, the experimental data and the analysis results almost coincide, indicating that the elastic modulus and the yield point of the material are correctly defined in the model. In the post-yield region, however, the experimental curve reaches lower values, while the FEA results predict the material's stress-strain

behaviour to be slightly stiffer than it actually is. Particularly after 0.03 strain, the FEA curve exceeds the experimental results, predicting approximately 50–80 MPa higher stress. This difference may stem from the Johnson–Cook parameters used representing the hardening behaviour more strongly than it actually is. Overall, the model successfully captures the tensile behaviour of the material, and the agreement with experimental data can be further improved with more precise calibration of the parameters.

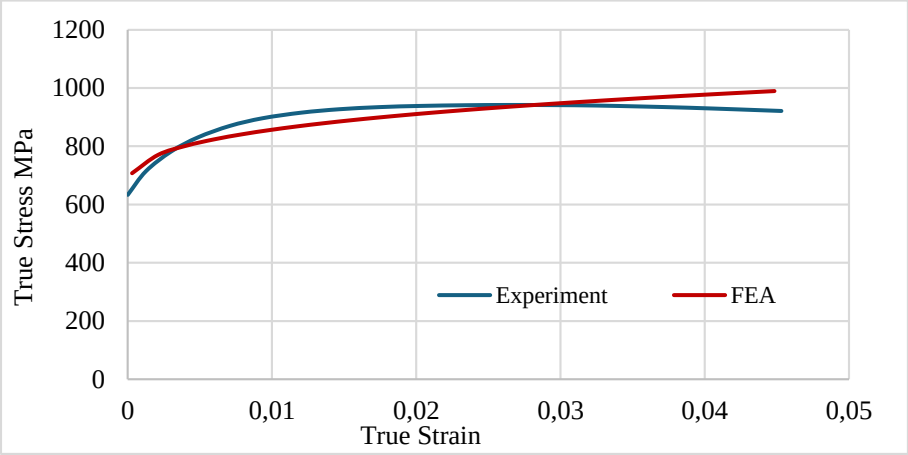


Figure 8. True stress–strain curves from experiment and FEA for AISI 1040 steel.

Conclusion and Recommendations

Tensile tests conducted at room temperature revealed that AISI 1040 steel has a tensile strength of approximately 950 MPa and exhibits a pronounced hardening tendency after yielding. With increasing temperature, the strength of the material decreased significantly, with a limited decrease observed at 300 °C, while at 500 °C, the tensile strength decreased to 320 MPa levels. At 700 °C, the material exhibited a ductile deformation behaviour with low tensile strength (~100 MPa) and almost no hardening. These results demonstrate that the yield stress and post-yield hardening capacity of AISI 1040 steel decrease significantly with increasing temperature.

Tests conducted at different strain rates have demonstrated that the material exhibits a distinct strain rate sensitivity. At a strain rate of 912 s^{-1}, the yield stress was around 650 MPa, whereas at strain rates of 1773 and 3232 s^{-1}, this value increased to 800–850 MPa levels and high strength was maintained up to approximately 15% plastic deformation. At the highest speed of 4393 s^{-1}, the material was damaged and therefore not used in the calibration of the JC parameters.

The Johnson–Cook material parameters (A = 630 MPa, B = 932 MPa, n = 0.3067, C = 0.0045, m = 0.8721) were determined using regression analyses based on the experimental data obtained. The analyses showed that the velocity sensitivity parameter (C) in particular was reliably defined with a high correlation coefficient (R^2 = 0.9969). Tensile test simulations performed by defining the calculated JC parameters in finite element software generally showed good agreement when compared with the experimental curves. While the results in the elastic region were almost identical, it was determined that the analysis results predicted approximately 50–80 MPa higher stress than the experimental data in the plastic region. This difference stems from the hardening coefficients used in the JC model representing the actual behaviour of the material as being harder

than it actually is. Overall, it was found that the model accurately reflects the material behaviour, with the maximum difference remaining below 10%.

In future studies, it is planned to conduct comparisons with Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) tests to validate the model at higher strain rates and to establish a comprehensive material model by calibrating the Johnson–Cook damage model parameters (D1–D5).

References

1. Satheesh Kumar, M., Shanmugam, D., & Prakash, S. (2017). *Experimental investigation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure additives in turning AISI 1040 steel*.
2. Prince, M., Mohanraj, T., & Shankar, S. (2020). *Tribological behaviour of Ti–6Al–4V coated AISI 1040 steel prepared by magnetron sputtering*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **923**, 012028.
3. Singh, V. P., Pandey, C., Mahapatra, M. M., & Kumar, P. (2019). *Fretting wear behaviour of AISI 1040 steel under different loading conditions*. .
4. Aakarsh, M., Suresh, M., & Kumar, A. (2023). *Effect of different quenching media on mechanical properties and corrosion resistance of AISI 1040 steel*.
5. Abid, M., Hussain, G., & Ahmed, F. (2023). *Bio-inspired thermo-mechanical processing to improve toughness of AISI 1040 steel*.
6. Prabhu, T., Kumar, S., & Raghunathan, V. S. (2019). *Fatigue behaviour of shot-peened EN-8 (AISI 1040) steel*.
7. Gök, A., Uzun, M., & Çiçek, A. (2013). *Finite element and experimental analysis of drilling forces in AISI 1040 steel*.
8. Yardımeden, A., & Turan, A. (2015). *Effect of cutting parameters on cutting forces in turning of AISI 1040 steel*.
9. Bosire, R. N., Muvengei, O. M., Mutua, J. M., & Kimotho, J. K. (2024). Development of a finite element model for prediction of cutting forces in turning of AISI 1040. *Journal of Sustainable Research in Engineering, 8*(2), 85–102.
10. Uğur, L. (2019). *3D end milling of AISI 1040: Finite element thermal analysis*. Journal of Engineering Research and Applied Science (JERAS), **8**(1), 184–192.
11. Uğur, L., & Kazan, H. (2020). *Finite element modelling of power consumption in turning of AISI 1040 steel*. Journal of Engineering Research and Applied Science (JERAS), **9**(2), 221–229.
12. Shrot, A., & Bäker, M. (2012). *Determination of Johnson–Cook parameters from machining simulations*. Computational Materials Science, **52**(1), 298–304.

HAVACILIK VE SAVUNMA MALZEMELERİ İÇİN YAPAY ZEKA DESTEKLİ YÜZEY İNCELEMESİ: YOLOV11 TABANLI BİR YAKLAŞIM

Behiye ŞAHİN

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

behiye_sahin@tarsus.edu.tr **(Sorumlu Yazar)** ORCID: 0009-0001-9632-0644

Murat BAKIRCI

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

mbakirci@uislab.org, muratbakirci@tarsus.edu.tr ORCID: 0000-0003-2092-1168

Özet

Endüstri 4.0 ve Akıllı Endüstri bağlamında endüstriyel süreçlerde yüksek standartları korumak için otomatik ve doğru kalite kontrol sistemleri hayati önem taşımaktadır. Çağdaş endüstriyel ortamların zorlu gereksinimlerini karşılamak amacıyla, bu çalışma, YOLOv11 nesne tanımlama algoritmasını kullanarak metal yüzeylerdeki küçük kusurları tespit etmek için gelişmiş bir yöntem sunmaktadır. Metal yüzeylerdeki çatlaklar ve kırıklar gibi mikro kusurların tespiti, yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilecekleri ve maliyetli arızalara yol açabilecekleri için önemlidir. Burada, mikro kusurları doğrusal, eğrisel, noktasal ve dallı olmak üzere dört kategoriye ayırıyoruz ve daha sonra eğitim çeşitliliğini artırmak için daha da geliştirilen kapsamlı bir kusur varyasyonları koleksiyonu oluşturmak için sentetik bir kusur oluşturma prosedürü kullanıyoruz. Bu geniş veri kümesi kullanılarak, YOLOv11 algoritması eğitilip değerlendirilmekte ve her kusur kategorisi için iyi geri çağırma ve hassasiyet oranları elde edilmektedir. Modelin güçlü ve iyileştirilebilecek yönleri, özellikle daha küçük ve daha zor hata türlerinde kapsamlı bir hassasiyet geri çağırma çalışmasıyla ortaya konmaktadır. Bulgulara göre YOLOv11, tekil kusurlar, tekrarlayan proses kaynaklı kusurlar ve olası hataya açık alanlar dahil olmak üzere metal yüzeylerdeki kusurları hassas bir şekilde tespit edip tanımlayabiliyor. Bu yetenekler, yapay zeka destekli otomasyon aracılığıyla kalite kontrol prosedürlerini iyileştirerek öngörücü bakım ve operasyonel verimliliği sağlamayı da içeren Endüstri 4.0 hedefleriyle uyumludur.

Anahtar Kelimeler: mikro hata tespiti, mikro çatlak tespiti, akıllı endüstri, endüstri 4.0, bilgisayarlı görme, YOLOv11, endüstriyel otomasyon.

Giriş

Metal yüzeylerdeki mikro kusurların tespiti, özellikle havacılık, otomotiv ve inşaat gibi yüksek riskli sektörlerde üretilen ürünlerin dayanıklılığını, kalitesini ve güvenliğini sağlamada önemli bir rol oynar [1]. Metal yüzeyler genellikle yüksek sıcaklıklar, gerilimler ve çevresel bozulma gibi yoğun operasyonel taleplere maruz kalır ve bu da zamanla mikro kusurların gelişmesine yol açabilir [2]. Bazen çıplak gözle görülemese de bu küçük kusurlar, daha büyük yapısal arızaların habercisi olabilir, malzemenin bütünlüğünü tehlikeye atabilir ve nihayetinde maliyetli onarımlara, duruş sürelerine ve hatta aşırı durumlarda felaket niteliğinde arızalara yol açabilir [3]. Bu mikro kusurların erken tespiti, yüksek ürün kalitesi standartlarını korumak ve güvenlik yönetmeliklerine uymak için kritik öneme sahiptir. Geleneksel muayene yöntemleri, bazı açılardan etkili olsa da, genellikle mikro kusurları büyük ölçekte tespit etmek ve kategorize etmek için gereken hassasiyet ve verimlilikten yoksundur [4]. Bu yaklaşımlar zaman alıcı, emek yoğun olabilir ve insan hatası veya tutarsızlık nedeniyle sınırlı olabilir. Bu nedenle, modern üretimde daha hassas, ölçeklenebilir ve otomatik bir çözüme duyulan ihtiyaç kaçınılmazdır. Bu zorunluluk, mikro kusurların doğru, güvenilir ve tahribatsız muayenesini sağlayabilen, kalite standartlarının karşılanmasını sağlarken insan müdahalesini ve ilgili maliyetleri azaltan bilgisayarlı görme tabanlı yaklaşımlar gibi gelişmiş tespit yöntemlerine yönelik araştırmaları teşvik etmektedir.

Mikro kusur tespiti kavramı, her ikisi de geleneksel üretim süreçlerini dönüştürmede gelişmiş teknolojilerin rolünü vurgulayan Akıllı Endüstri ve Endüstri 4.0 temalarıyla doğrudan bağlantılıdır. Siber-fiziksel sistemlerin, Nesnelerin İnterneti'nin (IoT) ve büyük verinin entegrasyonuyla karakterize edilen Endüstri 4.0, sistemlerin süreçleri gerçek zamanlı olarak otonom olarak izleyebileceği, analiz edebileceği ve optimize edebileceği tamamen bağlantılı ve akıllı fabrikalar için çabalamaktadır [5]. Bu çerçevede, metal yüzeylerde kusur tespiti kritik bir bileşen haline gelmektedir, çünkü otomatik kalite kontrol süreçleri üretim gecikmelerini önleyebilir, malzeme israfını azaltabilir ve üretim operasyonlarının genel verimliliğini artırabilir [6]. Üretim daha fazla otomasyon ve dijitalleşmeye doğru ilerlerken, yapay zeka destekli arıza tespiti gibi teknolojilerden yararlanmak, akıllı sistemlerin hem potansiyel sorunları tespit ettiği hem de verimliliği artırmak ve öngörücü bakım programlarını bilgilendirmek için verileri üretim döngüsüne geri beslediği Akıllı Endüstri vizyonuyla örtüşmektedir. Geleneksel yöntemlerden otomatik, veri odaklı çözümlere geçiş, fabrikaların arıza tespitinde daha yüksek doğruluk elde etmelerine, hataları en aza indirmelerine ve iş hacmini artırmalarına yardımcı olmaktadır [7]. Metal yüzeylerdeki mikro kusurların tespiti, üretim hattı genelinde güvenilirliği ve kaliteyi artırırken insan gözetimine olan ihtiyacı azaltan, kendi kendini düzelten, uyarlanabilir ve akıllı üretim süreçlerini mümkün kılarak Endüstri 4.0'ın özünü yansıtmaktadır.

Bu teknolojik değişim bağlamında, bilgisayarlı görme, doğru ve verimli arıza tespiti için en güçlü araçlardan biri olarak ortaya çıkmıştır. Bilgisayarlı görme teknikleri, metal yüzeyleri analiz etmek için invaziv olmayan bir yöntem sunarak en küçük kusurları bile yüksek hassasiyetle tespit etmektedir [8]. Gelişmiş algoritmalarla desteklenen bilgisayarlı görme sistemleri, mikro kusurları tespit edebilir, sınıflandırabilir ve ölçebilir ve insan görsel incelemesinin sınırlamalarını aşabilir [9]. Nesne tespit algoritmalarında kullanılanlar gibi derin öğrenme modelleriyle, bu sistemler belirli kusur türlerini veya kalıplarını tanıyacak şekilde eğitilebilir ve bu da son derece özelleştirilebilir ve uyarlanabilir kusur tespit sistemlerine olanak

tanır [10]. Bilgisayarlı görmenin üretim ortamlarına entegrasyonu, kalite kontrolünü geliştirir ve gerçek zamanlı kusur tespitine olanak tanıyarak üretim sürecini hızlandırır. Ayrıca, bilgisayarlı görme sistemleri tarafından toplanan büyük miktardaki veri, kalıpları veya tekrarlayan sorunları belirlemek için analiz edilebilir ve bu da önleyici bakımı bilgilendirebilecek, operasyonel verimliliği artırabilecek ve sürekli iyileştirme girişimlerini destekleyebilecek üretim süreci hakkında önemli bilgiler sağlar.

Bu çalışmada, YOLOv11 nesne algılama algoritmasından [11] yararlanarak metal yüzeylerdeki mikro kusurları tespit etmek için sistematik bir yaklaşım sunulmuştur. Algoritmayı etkili bir şekilde eğitmek için, daha sağlam bir model öğrenimine olanak tanıyan çeşitli ve temsili bir eğitim veri seti sağlamak üzere metal yüzeylerde sentetik kusurlar oluşturulmuştur. Bu sentetik veri üretimi, algoritmanın gerçek dünya senaryolarında karşılaşması muhtemel çok çeşitli kusur tiplerini ve yapılandırmalarını simüle etmeye yardımcı olarak genel algılama performansını iyileştirmiştir. YOLOv11 modelini bu zenginleştirilmiş veri seti üzerinde eğiterek, farklı metal yüzeylerdeki mikro kusurları tespit etmede gelişmiş doğruluk elde ettik. Eğitildikten sonra, model gerçek metal yüzeylere uygulandı ve tespit edilen her kusurun konumu kaydedilip çizildi. Bu konumların haritalanmasıyla, iki birincil kusur deseni ortaya çıktı: yüzey boyunca rastgele dağılmış bir kusur kümesi, tesadüfi kusurları temsil ediyordu. Buna karşılık, ikinci bir kusur kümesi sürekli olarak aynı konumlarda ortaya çıktı ve bu da üretim aşamasında donanım veya yazılım hataları gibi olası sistematik sorunları düşündürdü. Bu iki kusur türü arasında ayrım yapabilme yeteneği, tesadüfi kusurları ele almanın yanı sıra, tekrarlayan kusurlara yol açabilecek sistematik üretim sorunlarını tespit edip düzeltmeyi mümkün kılan değerli bir teşhis aracı sunar. Bu çalışmanın bulguları, bilgisayarlı görme ve sentetik veri artırmanın, proaktif kalite kontrolü ve akıllı üretim süreçlerini mümkün kılarak Akıllı Endüstri ve Endüstri 4.0'ın daha geniş hedeflerini destekleyerek mikro kusur tespitinde ilerlemeleri yönlendirme potansiyelini göstermektedir.

Metod

Metodoloji, algoritmayı sağlam bir sentetik kusur veri kümesi üzerinde eğitmeye ve doğruluk ve güvenilirliği optimize etmek için kontrollü bir ortamda performansını değerlendirmeye odaklanır. Tüm süreç temel aşamalardan oluşur: tespit algoritmasının seçimi ve yapılandırılması, modelin hem gerçek hem de sentetik olarak oluşturulmuş verilerle eğitilmesi, sentetik kusurların kategorilere ayrılması ve sistematik bir tespit sürecinin uygulanması. Her aşama, çeşitli mikro kusur türlerinin belirlenmesinde yüksek düzeyde hassasiyet elde etmek ve modelin akıllı üretim ortamlarındaki endüstriyel uygulamalar için pratik faydasını artırmak üzere tasarlanmıştır.

Uygun bir nesne tespit modeli seçerken, yüksek doğruluk, gerçek zamanlı işleme yeteneği ve mikro kusur tespitinin özel gereksinimlerine uyarlanabilirlik sağlayan bir algoritmaya olan ihtiyacı göz önünde bulundurduk. YOLO algoritma ailesi, nesne tespit görevlerindeki verimliliği ve hızıyla bilinir [12, 13]. Özellikle, bu çalışmada önceki sürümlere göre doğruluk ve hesaplama verimliliğinde önemli iyileştirmeler sunan en son teknoloji ürünü YOLOv11 varyantı kullanılmıştır. YOLOv11'in yüksek doğruluk oranlarını korurken hızlı tespitler gerçekleştiren gelişmiş mimarisi, onu özellikle hızlı hareket eden üretim hatlarında gerçek zamanlı kusur tespitinin önemli olduğu endüstriyel ortamlardaki uygulamalar için uygun hale getirir. Diğer YOLO versiyonlarında olduğu gibi YOLOv11 de, tek bir ileri geçişte nesne tespiti

gerçekleştiren ve bu sayede belirli bir görüntüdeki birden fazla nesnenin varlığını ve konumunu hızla tespit edebilen bir evrişimli sinir ağı (CNN) temeline dayanır [14]. Bu tek atışlı tespit yeteneği, modelin görüntüler sisteme aktarılırken kusurları gerçek zamanlı olarak tespit etmesini sağladığı için bu uygulama için kritik öneme sahiptir.

Güvenilir bir tespit performansı elde etmek için YOLOv11, hem gerçek hem de sentetik olarak oluşturulmuş kusur görüntülerini içeren bir veri kümesi üzerinde kapsamlı bir şekilde eğitilmiştir. Belirli kategoriler için etiketli mikro kusur görüntülerinin sınırlı bulunabilirliği nedeniyle, hem gerçek hem de sentetik verileri birleştiren hibrit bir eğitim yaklaşımı benimsenmiştir. Eğitim veri kümesi, gerçek endüstriyel metal yüzeylerden yakalanan 1.571 etiketli kusur görüntüsü içermekte olup, üretim ortamlarında sıklıkla görülen temsili mikro kusurlara odaklanılmıştır. Veri setinin sentetik kısmı için dört temel kusur kategorisi oluşturuldu: doğrusal, eğrisel, noktasal ve dallanmış. Bu kategoriler, metal üretim süreçlerinde gözlemlenen yaygın kusur türlerinin incelenmesine dayanarak seçildi ve gerçek dünya koşullarının doğru bir şekilde simüle edilmesine hizmet etti. Sentetik olarak oluşturulan bu kusur görüntülerini kullanarak veri setini önemli ölçüde genişlettik, YOLOv11'e çeşitli kusur örnekleri sağladık ve genelleme yeteneğini geliştirdik. Eğitim, aşırı uyum riski olmadan yakınsamayı optimize eden bir öğrenme hızı ve mevcut hesaplama kaynaklarının verimli kullanımını sağlayan toplu iş boyutları da dahil olmak üzere YOLOv11'e özgü eğitim parametreleri kullanılarak gerçekleştirildi. Eğitim sırasında, veri seti çeşitliliğini artırmak için rastgele döndürmeler, çevirmeler ve parlaklık ayarlamaları gibi çeşitli veri artırma teknikleri uygulandı. Sonuç, gerçek bir üretim ortamında karşılaşılabilecek farklı yönelimler, ışık değişimleri ve küçük bozulmalar gibi çeşitli koşullar altında kusurları tespit etmek üzere sağlam bir şekilde eğitilmiş bir model oldu. Etiketli kusur görüntülerinden oluşan kapsamlı bir veri kümesi elde etmenin getirdiği zorluklar nedeniyle, bu çalışmada çeşitli ve temsili bir eğitim veri kümesi oluşturmak için sentetik veri üretimi kullanılmıştır. Metal yüzeylerdeki gerçek kusurları simüle etmek için sentetik olarak dört tür kusur üretilmiştir: Doğrusal kusurlar, metallerin endüstriyel işlenmesinde sıklıkla görülen çizikleri veya ince çatlakları simüle eden düz veya neredeyse düz bir şekille karakterize edilir. Kavisli kusurlar, üretim sırasında mekanik gerilmeler veya darbelerden kaynaklanan bükülmüş çatlaklar veya kavisli girintiler gibi daha düzensiz bir yol izleyen kusurları temsil eder.

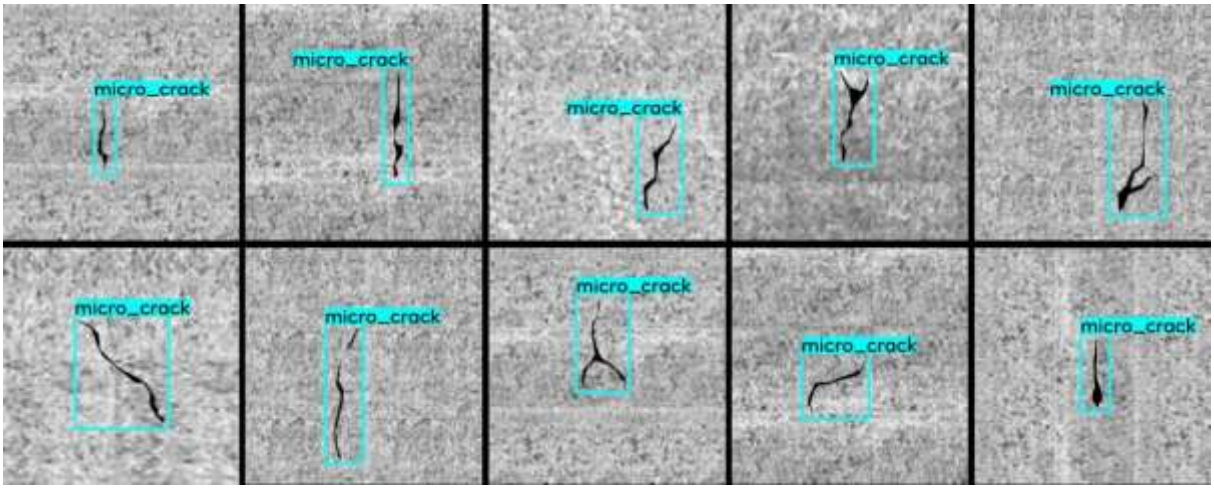
Noktasal kusurlar, genellikle küçük, izole noktalar olarak görünür ve çevresel veya kimyasal koşullara maruz kalan metal yüzeylerde yaygın olarak bulunan çukurlaşma veya lokal korozyonu simüle eder. Dallanmış kusurlar, çatlak veya kusurun iki veya daha fazla kola ayrıldığı benzersiz bir morfoloji sergiler. Bunlar, metal matristeki stres kırıklarını veya zayıflıkları gösterebilecek yapısal sorunları temsil eder. YOLOv11'in çeşitli kusur türlerine uyarlanabilirliğini sağlamak için başlangıçta her kusur kategorisinin 300'den fazla varyasyonu oluşturuldu. Bu varyasyonlar, renk, kontrast, yönelim ve ölçekte ayarlamalar da dahil olmak üzere bir dizi artırma tekniğiyle daha da geliştirildi ve her kusur kategorisi için kapsamlı bir veri kümesi elde edildi. Artırılmış veriler, farklı ışıklandırma ve yüzey koşulları altında kusur görünümündeki değişkenliği yakalamaya yardımcı olarak, tespit algoritmasını eğitmek için sağlam bir veri kümesi sağladı. Bu sentetik kusurları oluşturmak için, gerçekçi kusur dokularını simüle eden Unity 2D ve uzamsal filtrelerin bir kombinasyonunu kullandık. Her kusur kategorisi, kusur uzunluğunu, eğriliğini, boyutunu ve dallanma karmaşıklığını örnekler arasında değiştirmeye olanak

tanıyan belirli morfolojik özelliklerle programlandı. Örneğin, doğrusal kusurlar uzunluk ve genişlik açısından farklılık gösterirken, nokta kusurları yüzey deformasyonunu simüle etmek için farklı yoğunluk seviyeleri ve çevreleyen hale etkileriyle oluşturuldu. Bu yaklaşım, veri setini önemli ölçüde genişletti ve ayrıca oluşturulan kusurların gerçek endüstriyel ortamlarda karşılaşılan kusurlara çok benzemesini sağladı.

Model eğitildikten sonra, tespit yeteneklerini test etmek için deneysel bir ortama yerleştirildi. Hem bilinen kusurlara sahip test numuneleri hem de sentetik kusurlarla yapay olarak gömülmüş yüzeyler dahil olmak üzere metal yüzeylerin görüntüleri, tespit sistemi tarafından yakalandı ve analiz edildi. Her görüntü, tespit doğruluğunu artırmak için kontrast iyileştirme ve gürültü azaltma dahil olmak üzere ön işleme tabi tutuldu. Tespit sistemi, üretim hattından alınan görüntüleri işleyerek sürekli modda çalıştı. Tespit edilen her kusur, kusur türüne göre lokalize edildi ve kategorilere ayrıldı ve koordinatları analiz için saklandı. Bu yerelleştirme verileri, metal yüzeydeki kusur dağılımının haritalanmasını, rastgele kusurların yanı sıra üretim sürecinde sistematik sorunlara işaret edebilecek kusur kümelerinin de belirlenmesini sağladı. Haritalama süreci, ekipman arızaları veya diğer üretim düzensizlikleri nedeniyle kusurların ortaya çıkma olasılığının daha yüksek olduğu alanları vurguladığı için, potansiyel olarak tekrar eden kusurların belirlenmesinde özellikle yararlıydı.

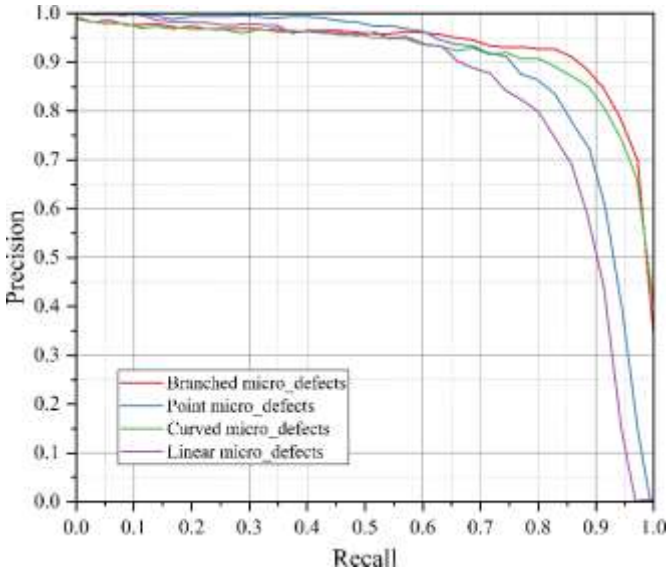
Kusur tespitinin ardından, tespit doğruluğunu değerlendirmek ve kusurların mekansal dağılımını yorumlamak için bir işlem sonrası analizi gerçekleştirildi. Bu analizin temel amacı, kusur oluşumundaki kalıpları belirlemek ve modelin rastgele ve sistematik kusurları ayırt etme yeteneğini değerlendirmekti. Tespit edilen kusurlar, mekansal kümeleme metriklerine göre sınıflandırıldı ve yüksek kusur yoğunluğuna sahip alanlar, üretim sürecinde potansiyel endişe noktaları olarak işaretlendi. Rastgele dağılmış kusurlar, muhtemelen malzeme tutarsızlıklarından kaynaklanan tesadüfi kusurlar olarak kabul edilirken, kusur kümeleri, ekipman aşınması veya çevresel faktörler gibi olası üretim hattı sorunlarının göstergeleri olarak analiz edildi. YOLOv11 modelinin mikro kusurları tespit etme ve sınıflandırmadaki performansını doğrulamak için hassasiyet, geri çağırma ve F1 puanı gibi bir dizi değerlendirme metriği kullanıldı. Bu metrikler, modelin her kusur kategorisinde tespit doğruluğunu değerlendirmek için gerçek ve sentetik kusur örnekleri içeren etiketli bir test veri kümesine dayalı olarak hesaplandı. Daha ileri doğrulama, tespit sisteminin eğitim sırasında daha önce karşılaşılmamış yeni bir metal yüzey görüntüsü grubuna uygulanmasıyla gerçekleştirildi. Model eğitimi için sentetik kusur oluşturmanın kullanılması, daha fazla veri çeşitliliği ve gerçek dünya koşullarında nadir veya yakalanması zor olan kusurları simüle etme yeteneği gibi çeşitli avantajlar sağladı. Sentetik veri kümesi, çeşitli kusur niteliklerini kontrol etmemize olanak tanıyarak modelin eğitim sırasında çok çeşitli kusur morfolojileriyle karşılaşmasını sağladı. Ancak, sentetik kusur tespitinin temel zorluğu, oluşturulan kusurların gerçek dünya koşullarını doğru bir şekilde temsil etmesini sağlamaktır; bu da kusur parametrelerinin dikkatli kalibrasyonu ve gerçek kusur örnekleriyle doğrulama yoluyla azaltılmıştır.

Bulgular



Şekil 1. YOLOv11 kullanılarak metal yüzeylerde mikro kusur tespit örnekleri. Şekil, metal yüzeyde doğrusal, eğrisel ve dallı çatlakların varlığının tespit edildiği ilk tespit sonuçlarını göstermektedir. Her kusur türü, sınırlayıcı kutularla doğru bir şekilde vurgulanmış olup, YOLOv11'in kusur tespiti ve konumlandırma doğruluğundaki yüksek hassasiyetini göstermektedir.

Şekil 1, YOLOv11 ile gerçekleştirilen ilk mikro kusur tespitlerinden bir seçkiyi göstermektedir. Bu erken aşama değerlendirmesinde, algoritmanın metal yüzeydeki kusurların varlığını güvenilir bir şekilde tespit edip edemeyeceğini belirlemek için belirli bir kategorilendirme yapılmadan mikro kusurlar tespit edilmiştir. Şekilde doğrusal, eğrisel ve dallanmış çatlak örnekleri yer almaktadır. YOLOv11'in tüm görünür çatlakları doğru bir şekilde tespit ettiği ve güçlü bir temel tespit kabiliyeti gösterdiği açıktır. Her bir kusurun etrafına sınırlayıcı kutuların hassas bir şekilde yerleştirilmesi, yüksek tespit hassasiyetini göstermektedir. Sınırlayıcı kutular ve kusur kenarları arasındaki bu hizalama, YOLOv11'in kusurları doğru bir şekilde tespit edebildiğini ve kusur yapısı değişse bile bunları çevreleyen yüzeyden ayırabildiğini göstermektedir. Etkili sınırlayıcı kutu yerleşimi ayrıca, YOLOv11'in her bir kusurun kapsamını ve yönünü yakalama yeteneğini de vurgulamaktadır; bu, sonraki kusur sınıflandırması ve analizi için önemli bir özelliktir.

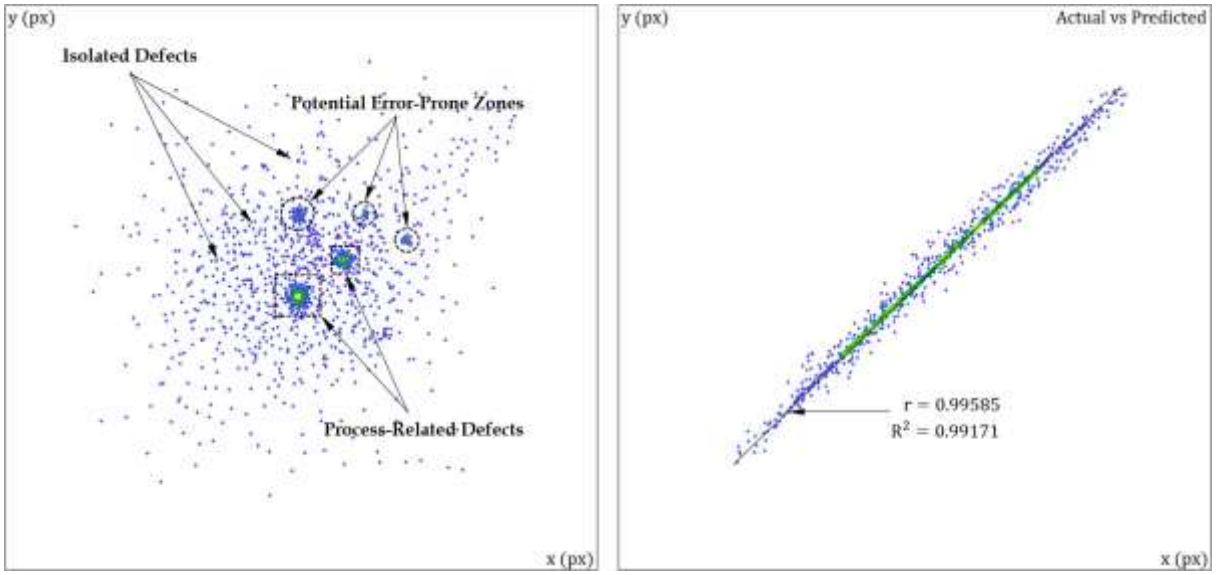


Şekil 2. YOLOv11 için doğrusal, eğrisel, noktasal ve dallı çatlaklar olmak üzere dört mikro kusur kategorisine ait Hassasiyet- Geri Çağırma (PR) eğrileri. PR eğrileri, gözlemlenen farklı hassasiyet değerleriyle her kusur türü için tespit performansını göstermektedir. Doğrusal çatlaklar, muhtemelen dar yapıları nedeniyle en yüksek tespit zorluğunu oluşturmaktadır. Eğrisel kusurlar daha yüksek tespit edilebilirlik gösterirken, noktasal ve dallı kusurlar en iyi performansı sergileyerek YOLOv11'in farklı kusur geometrilerindeki etkinliğini göstermektedir.

Şekil 2'de gösterilen hassasiyet/geri çağırma (PR) eğrileri, YOLOv11'in dört kusur kategorisindeki performansının daha ileri bir analizini sunmaktadır: doğrusal, eğrisel, nokta ve dallanmış. PR eğrileri, tüm kusur kategorilerinde yüksek bir genel başarı oranı göstermektedir ve bu da YOLOv11'in çeşitli mikro kusur türlerini genel olarak güvenilir bir hassasiyet seviyesiyle ayırt edebildiğini göstermektedir. Ancak, kategoriler arasındaki hassasiyet değerlerinde belirgin farklılıklar vardır. Sezgisel olarak tespit edilmesi daha kolay gibi görünen doğrusal kusurlar, nispeten düşük hassasiyet değerinden de anlaşılacağı üzere YOLOv11 için bir zorluk teşkil etmektedir. Bu tutarsızlığın olası bir açıklaması, doğrusal çatlakların inceliğidir; bu da özellikle çatlaklar silik olduğunda veya yüzey dokusu tarafından gizlendiğinde, bunların metal yüzeyindeki arka plan gürültüsünden ayırt edilmesini zorlaştırabilir. Buna karşılık, kavisli kusurlar nispeten daha yüksek hassasiyet değerleri sağlar. Algoritmanın bu kusurları tespit etmedeki kolaylığı, metal dokularda tipik olarak bulunan doğrusal desenlerden daha farklı olabilen sürekli eğriliğe bağlanabilir. Noktasal kusurlar ve dallı kusurlar, PR eğrilerindeki yüksek hassasiyet değerlerine yansıdığı gibi, en kolay tespit edilebilen kategoriler olarak ortaya çıkmaktadır. Noktasal kusurlar genellikle küçük ancak izole özelliklerdir ve bu da YOLOv11'in bunları bulmasını kolaylaştırır. Benzer şekilde, ayırt edici çatallı yapılarıyla dallanmış kusurlar, benzersiz morfolojileri sayesinde kolayca tanımlanabilir ve bu da modelin bu kusurları diğer yüzey özelliklerinden ayırt etme yeteneğini artırır.

Şekil 3, mekansal analiz yoluyla kusur dağılımını ve tespit doğruluğunu göstermektedir. Sol grafik, tespit edilen kusurların metal yüzeydeki dağılımını ve tespit edilen kusurların etrafındaki

sınırlayıcı kutuların merkezlerini işaretleyen noktaları göstermektedir. Sol grafikteki iki birincil küme, İşlemle İlgili Kusurlar olarak etiketlenen yüksek yoğunluklu alanları göstermektedir. Bu bölgeler, muhtemelen üretim sürecindeki yerel sorunlardan kaynaklanan, metal yüzeydeki belirli noktalarda tekrarlayan kusur oluşumlarını göstermektedir. Ek olarak, Potansiyel Hataya Eğilimli Bölgeler olarak işaretlenen diğer üç bölgede de orta düzeyde kusur kümelenmesi görülmektedir; ancak bu bölgelerdeki kusur yoğunluğu, işlemle ilgili kusur bölgelerine göre belirgin şekilde daha düşüktür. Yüzeye dağılmış olan kalan kusur noktaları, İzole Kusurlar olarak etiketlenmiştir. Bu izole oluşumlar, sistemik üretim sorunlarından ziyade muhtemelen rastgele anomalileri temsil etmektedir. Şekil 3'teki sağdaki grafik, tespit edilen kusurların sınırlayıcı kutu merkez koordinatlarının gerçek yer koordinatlarına göre karşılaştırmalı bir saçılım grafiğini sunmaktadır. X ekseni gerçek yer değerlerini temsil ederken, y ekseni YOLOv11'in tahmin edilen değerlerini göstermektedir. Veri noktaları doğrusal eğilim çizgisiyle yakından hizalanmakta ve Pearson r değeri 0,99585 ve R^2 değeri 0,99171'dir. Bu metrikler, modelin tahminleri ile gerçek kusur konumları arasında yüksek derecede bir korelasyon olduğunu doğrulayarak YOLOv11'in mekansal lokalizasyondaki doğruluğunu ortaya koymaktadır. Saçılım grafiğinin neredeyse mükemmel doğrusallığı, modelin kusur konumlarını doğru bir şekilde eşleştirdiğini ve metal yüzeylerde hassas kusur haritalaması için güvenilirliğini doğruladığını göstermektedir. Bu mekansal dağılım ve doğruluk analizi, algoritmanın hem mikro kusurları tespit etme hem de lokalize etmedeki etkinliğini güçlendirmektedir.



Şekil 3. Tespit edilen mikro kusur konumlarının dağılım haritası, tespit edilen her kusur için sınırlayıcı kutuların merkez koordinatları çizilmiş (sol). İki yüksek yoğunluklu küme, potansiyel üretim kaynaklı kökenleri gösteren Süreçle İlgili Kusurlar olarak işaretlenmiştir. Üç ek, orta yoğunluklu bölge, Potansiyel Hataya Eğilimli Bölgeler olarak etiketlenirken, kalan dağılım noktaları İzole Kusurlar olarak kategorize edilmiştir. Tespit edilen kusurlar için sınırlayıcı kutuların merkez koordinatlarını gerçek koordinatlarla karşılaştıran dağılım grafiği (sağ). Son

derece yüksek korelasyon katsayısı (r) ve R^2 değerleriyle gözlemlenen doğrusal eğilim, YOLOv11'in tespitinin gerçek verilere göre mekansal doğruluğunu teyit etmektedir.

Sonuç

Bu makalede sunulan çalışma, YOLOv11 algoritmasının metal yüzeylerdeki mikro kusurları tespit etme ve kategorilere ayırma konusundaki etkinliğini göstermektedir. Doğrusal, eğrisel, noktasal ve dallı olmak üzere dört farklı kusur kategorisinde tespit performansının kapsamlı bir analizi yoluyla, bu çalışma YOLOv11'in mikro düzeyde endüstriyel kusurları tespit etmedeki yetenekleri ve sınırlamaları hakkında temel sonuçları ortaya koymaktadır. Bulgularımız, YOLOv11'in çeşitli morfolojilerdeki kusurları tespit etmede yüksek doğruluk sağladığını ve dallı ve eğrisel çatlaklar gibi daha büyük ve daha belirgin kusur türleri için olağanüstü bir performans gösterdiğini vurgulamaktadır. Çeşitli kusur şekillerine bu uyum sağlama yeteneği, YOLOv11'i hassasiyet ve hızlı tespitin çok önemli olduğu kalite kontrol süreçlerinde dağıtım için umut verici bir aday haline getirmektedir. Algoritmanın, zemin gerçeği kusur konumlarıyla neredeyse mükemmel bir korelasyon yoluyla gösterilen mekansal yerelleştirmedeki etkinliği, YOLOv11'in yalnızca kusurların varlığını tespit etmekle kalmayıp aynı zamanda metal yüzeylerdeki konumlarını doğru bir şekilde haritalayabildiğini de göstermektedir. Bu yetenek, prosesle ilgili hata kümelerinin ve potansiyel hata eğilimli bölgelerin belirlenmesine olanak tanıyarak üreticilerin kalite endişelerini proaktif bir şekilde ele almalarına yardımcı olduğu için öngörücü bakım açısından kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, çalışma aynı zamanda belirli hata türlerinin, özellikle de 1 mikronun altındaki doğrusal ve noktasal hatalar gibi daha küçük veya daha ince olanların tespitinde belirli zorlukları da tespit etmektedir. Bu bulgular, YOLOv11'in genel olarak etkili olmasına rağmen, incelikli hataların tespit doğruluğunu artırmak için iyileştirme ve tamamlayıcı tekniklere ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir. Veri artırma ve sentetik hata oluşturma, modelin eğitilmesinde ve veri setinin çeşitlendirilmesinde faydalı olmuş ve bu da muhtemelen YOLOv11'in farklı hata türleri arasında sağlamlığına katkıda bulunmuştur.

Referanslar

[1] Y. Yan, S. Kaneko, H. Asano, "Accumulated and aggregated shifting of intensity for defect detection on micro 3D textured surfaces," Pattern Recognition, vol. 98, no. 107057, 2020.

[2] L. Song, X. Li, X. Y. Yang, X. Zhu, Q. Guo, H. Yang, "Detection of Micro-Defects on Metal Screw Surfaces Based on Deep Convolutional Neural Networks," Sensors, vol. 18, no. 3709, 2018.

[3] X. Fang, Q. Luo, B. Zhou, C. Li, L. Tian, "Research Progress of Automated Visual Surface Defect Detection for Industrial Metal Planar Materials," Sensors, vol. 20, no. 5136, 2020.

[4] Y. Chen, Y. Ding, F. Zhao, E. Zhang, Z. Wu, L. Shao, "Surface Defect Detection Methods for Industrial Products: A Review," Applied Sciences, vol. 11, no. 7657, 2021.

[5] I. Berges, V.J. Ramírez-Durán, A. Illarramendi, "A Semantic Approach for Big Data Exploration in Industry 4.0," Big Data Research, vol. 25, no. 100222, 2021.

[6] T. Wang, Y. Chen, M. Qiao, et al., "A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94, pp. 3465–3471, 2018.

[7] S. Meister, M.A.M. Wermes, J. Stüve, et al., "Review of image segmentation techniques for layup defect detection in the Automated Fiber Placement process," Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 32, pp. 2099–2119, 2021.

[8] H.Y.T. Ngan, G.K.H. Pang, N.H.C. Yung, "Automated fabric defect detection—A review," Image and Vision Computing, vol. 29, no. 7, pp. 442-458, 2011.

[9] Z. Ren, F. Fang, N. Yan, et al., "State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision," Int.
J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., vol. 9, pp. 661–691, 2022.

[10] A.A. Tulbure, A.A. Tulbure, E.H. Dulf, "A review on modern defect detection models using DCNNs – Deep convolutional neural networks," Journal of Advanced Research, vol. 35, pp. 33-48, 2022.

[11] G. Jocher, J. Qiu, “Ultralytics YOLO11,” https://github.com/ultralytics/ultralytics, 2024.

[12] J. Yan, Z. Wang, “YOLO V3+VGG16-based automatic operations monitoring and analysis in a manufacturing workshop under Industry 4.0,” Journal of Manufacturing Systems, vol. 63, pp. 134-142, 2022.

N. Zendehdel, H. Chen, M.C. Leu, “Real-time tool detection in smart manufacturing using You-Only-Look-Once (YOLO)v5,” Manufacturing Letters, vol. 35, pp. 1052-1059, 2023.

[13] D. Neupane, Y. Kim, J. Seok, J. Hong, “CNN-based fault detection for smart manufacturing,” Applied Sciences, vol. 11, no. 11732, 2021.

ATEŞLİ SİLAHLARDA NİHAİ ÜRÜN İÇİN METAL EKLEMELİ İMALAT PARÇALARININ KULLANIMI

Yüksel GÜNAR

Kalekalıp San.A.Ş., Hafif Silahlar AR-GE Müdürlüğü, İstanbul -Türkiye

Özet / Abstract

Bu makale, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 1.2709 MS1 çeliği parçaların KMR762 keskin nişancı tüfeğinde nihai ürün olarak kullanılabilirliğini incelemektedir. Sekiz kritik parçanın SLM ile üretilmesi sonrası 10 000 atım dayanım testi uygulanmış, fonksiyon ve malzeme bütünlüğü geleneksel talaşlı imalat parçalarıyla eşdeğer bulunmuştur. Grafik verileri SLM'nin parça başına üretim süresini ve maliyeti düşük hacimli üretimde %30-50 oranında azalttığını göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü gibi sınırlamalar ek işleme gerektirse de SLM; kalıpsız üretim, hızlı tasarım iterasyonu ve yüksek mukavemet avantajlarıyla savunma sanayiinde stratejik bir alternatiftir.

Anahtar Kelimeler

Ateşli Silahlar, Metal Eklemeli İmalat; Seçici Lazer Ergitme, Maraging Çeliği 1.2709

1. Giriş

Metal eklemeli imalat, İngilizce adıyla Additive Manufacturing (AM), savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve tıp gibi sektörlerde tasarım özgürlüğü, malzeme verimliliği ve hızlı prototipleme olanaklarıyla öne çıkmaktadır. Metal tozlarının lazerle katmanlı ergitilmesine dayanan Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, yüksek mekanik dayanım gerektiren karmaşık parçaların düşük adetli üretiminde özellikle avantajlıdır. Bu çalışma, SLM'nin keskin nişancı tüfekleri ve bomba-atar gibi düşük hacimli ateşli silahlarda nihai parça üretimine katkısını değerlendirmektedir.

Resim: SLM Kurma Kolu, Mekanizma Ayaklama Mandalı, Şarjör mandalı Parçaları

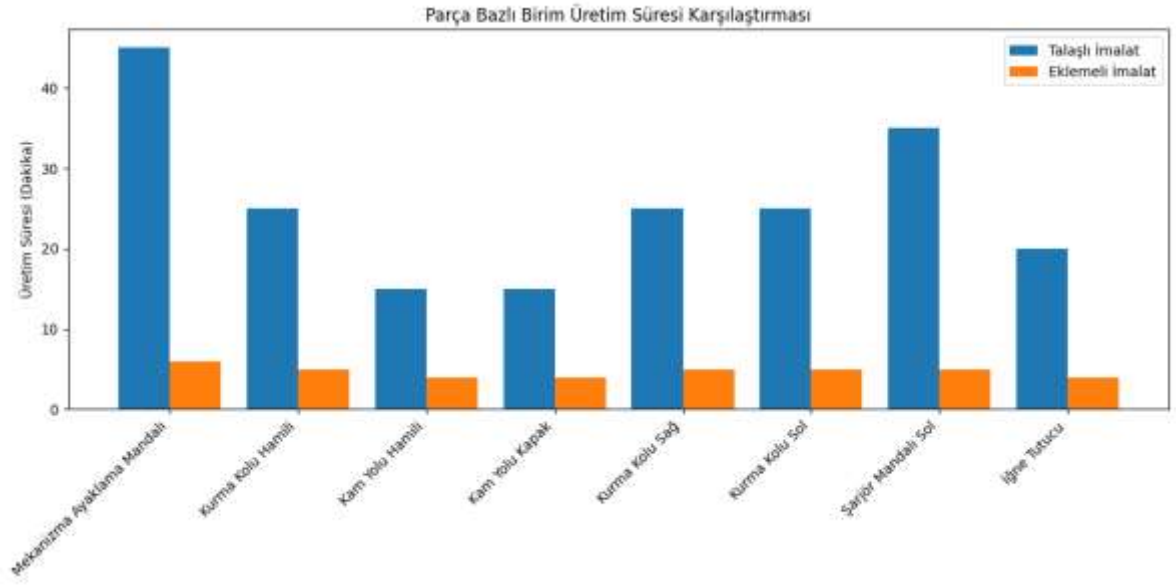
2. Maliyet ve Üretim Süresi Açısından Değerlendirme

Geleneksel üretim yöntemleri, büyük hacimli ve tekrarlayan üretimler için maliyet açısından daha avantajlıdır. Ancak düşük adetli, özelleştirilmiş ve karmaşık geometrili parçalar söz konusu olduğunda, bu yöntemlerin verimliliği azalmakta ve maliyetler artmaktadır. CNC tezgâhları, dövme, döküm, MIM gibi teknikler yüksek kalıp, takım ve işçilik maliyetleri gerektirir.

Buna karşılık SLM yöntemi, kalıpsız üretim avantajı, dijital tasarımdan üretime geçişin hızlı olması ve şekilsel esneklik gibi avantajlarla öne çıkmaktadır. Bu çalışmada yapılan analizlere göre, uygun malzeme, doğru parametre seçimi ve etkili post-proses işlemleriyle, geleneksel yöntemlere kıyasla %50'ye varan bir maliyet tasarrufu elde edilebilmiştir. Ayrıca üretim sürecinin dijital olması, mühendislik değişikliklerinin hızlıca uygulanmasını da mümkün kılmaktadır.

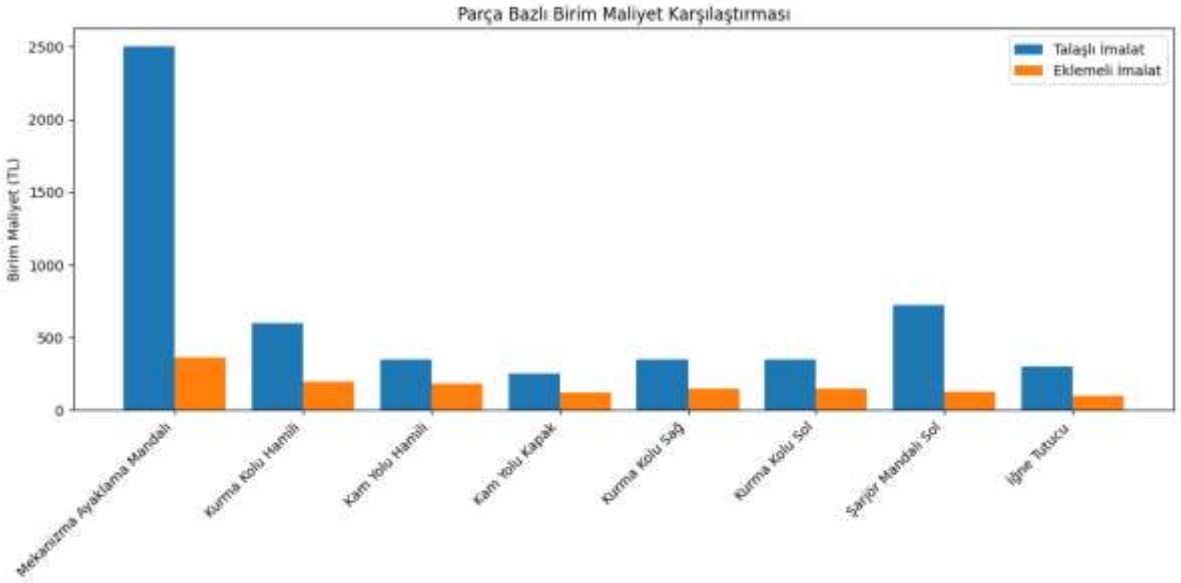
2.1 Parça Bazlı Üretim Süresi Karşılaştırması

Şekil 1. Parça Bazlı Birim Üretim Süresi Karşılaştırması: Geleneksel talaşlı imalatla kıyaslandığında SLM, karmaşık geometrilerde üretim süresini %30-50 kısaltmaktadır.



2.2 Parça Bazlı Maliyet Karşılaştırması

Şekil 2. Parça Bazlı Birim Maliyet Karşılaştırması: Düşük hacimli üretimde SLM, parça başına maliyeti %30-50 azaltmaktadır.



3. Performans Testleri ve Sonuçları

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların kullanıldığı bir silahla aşağıdaki testler uygulanmıştır.

- +52° de önce 6 saat şartlandırma ve 100 atım, sonrasınra 2 saat şartlandırma ve tekrar 100 atım olmak üzere toplamda 2 döngüde 200 atım yüksek sıcaklık testi

- -32° önce 6 saat şartlandırma ve 100 atım, sonrasınra 2 saat şartlandırma ve tekrar 100 atım olmak üzere toplamda 2 döngüde 200 atım düşük sıcaklık testi
- Dinamik Kum ve Toz Testi, Kabinde 100 atım
- Mukavemet testi, 10.000 atım dayanım testi simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu testler sırasında parçaların çalışma fonksiyonları gözlemlenmiş ve test süresince tüm parçaların hatasız şekilde çalıştığı tespit edilmiştir.

Testin sonunda, parçalarda herhangi bir deformasyon olup olmadığını belirlemek amacıyla görsel muayene ve Manyetik Parçacık Muayenesi (MPI) testleri uygulanmıştır. Yapılan incelemelerde, parçalarda çatlak, kırık veya kopma gibi herhangi bir kusura rastlanmamıştır.

Sonuç olarak, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçalar, fonksiyonel performans ve dayanım açısından beklenen tüm şartları başarıyla sağlamıştır.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen sekiz kritik parçanın, KMR762 keskin nişancı tüfeği üzerindeki performansı kapsamlı olarak incelenmiştir. Yapılan 10.000 atım simülasyonu; fonksiyon testleri, görsel muayene ve Manyetik Parçacık Muayenesi (MPI) sonuçları, SLM parçalarının geleneksel talaşlı imalatla üretilen muadilleriyle aynı dayanım ve işlevselliği sağladığını göstermiştir.

Grafik verileri, SLM'nin parça başına üretim süresini %30-50; maliyeti ise düşük hacimli üretim senaryosunda %30-50 oranında düşürdüğünü ortaya koymaktadır. SLM'nin kalıpsız üretim avantajı, tasarım değişikliklerine hızlı yanıt verebilme esnekliği ve 1.2709 MS1 malzemesinin ısıl işlem sonrası ulaştığı 55 HRC sertlik değeri, savunma sanayi için stratejik üstünlük sağlamaktadır.

Bununla birlikte SLM'in yüzey pürüzlülüğü ve dar tolerans gerektiren bölgelerde ek işleme (taşlama, honlama vb.) ihtiyaç duyduğu unutulmamalıdır. Ayrıca toz kalitesi, makine parametre stabilizesi ve parçaların yönlendirilmesi gibi süreç değişkenleri, seri üretim ölçeğine çıkıldığında dikkatle kontrol edilmelidir.

5. Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

1. **Yüzey İşleme Optimizasyonu:** Taşlama/honlama parametrelerinin sistematik incelenmesiyle sürtünme kritik yüzeyler iyileştirilebilir.
2. **Malzeme Çeşitliliği:** 17-4PH paslanmaz çelik ve Al-Si-Mg alaşımlarında benzer testlerin yürütülmesi.
3. **Seri Üretim Ölçekleme:** Destek yapısı ve parça yerleşim optimizasyonu ile baskı ve temizleme sürelerinin kısaltılması.
4. **Yorulma ve Termal Şok Dayanımı:** Uzun ömür ve çevresel dayanım test programları.
5. **Toz Tedarik ve Geri Dönüşüm:** Tedarik zinciri güvenliği ve maliyet verimliliği için toz geri kazanım stratejileri.

6. Kaynakça

1. ISO 2768-1:1989. *General Tolerances – Part 1: Linear & Angular Dimensions*.
2. ISO 2768-2:1989. *General Tolerances – Part 2: Geometrical Tolerances*.
3. ASTM F2924-14. *Specification for AM Ti-6Al-4V with Powder Bed Fusion*.
4. TOP.3.2.45 Test Operation Procedure, Small arms- Hand, Shoulder weapons and Machine guns
5. Kruth, J.-P. et al. "Benchmarking of Different SLM Machine Architectures," *CIRP Annals*, 62(1), 2013, 595-598.
6. Wong, K.V. & Hernandez, A. "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
7. Oyelola, O. et al. "Mechanical Properties of 1.2709 Maraging Steel Fabricated by SLM," *Materials Science and Engineering A*, 780, 2020.

SCRUTİNİZİNG THE SEAWATER DEGRADATİON RESİSTANCE OF ALTERNATE AND SİMİLAR İNTERFACES İN CARBON-BASALT HYBRİD COMPOSİTES USİNG ACOUSTİC EMİSSİON

Hafız Muhammad Numan ZAFAR
Research and Development Specialist, KIM Technologies, Kayseri-Türkiye
numan.zafar@live.com; ORCID: 0000-0001-7122-4974

Fehmi NAİR
Prof. Dr., (Corresponding Author), Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Erciyes University, 38039 Kayseri-Türkiye
fnair@erciyes.edu.tr; ORCID: 0000-0003-3519-6771

Abstract:
The fiber-hybridized class of the reinforced plastics has recently been adopted to various military and civil submarine applications ranging from advanced vessels to simpler catamarans and trimarans. The widely used carbon fibers are usually hybridized with aramid or glass fibers for serving as masts, hulls, and offshore risers causing regular exposure to seawater. While the submarine technologies benefit from the low maintenance costs, reduced weight-to-thickness ratio, wave-transparency, and low corrosion rate of the composites, fibers are hybridized with cheaper alternatives for cost-efficiency as well as reducing seawater attacks. Despite routinely reported studies on the seawater stability of the fiber reinforced plastics, the extended exposure data (several months) on the dedicated architectures carbon-basalt hybrid composites with advanced acoustic emission technique is limited. Current study reports the influence of seawater exposure duration (9 months) on the intraply hybrid configurations. It also presents a guide that can be used to correlate the mechanical loading response of the composites with the acoustic signals.

Keywords: Hybrid Composites, Seawater stability, Interply Hybrid, Acoustic Emission, Signals Monitoring, Short Beam Shear.

Introduction

The challenging environment of the seawater demands materials to show adequate resistance to chemical attacks and minimal degradation in the properties for proper functioning and durability(Abdurohman and Adhitya 2019). Polymer matrix composites excel the traditional metal-based materials for submarine applications simply due to excellent weight-to-thickness ratio, ease of manufacturing/installing and most importantly, better corrosion resistance compared to metal/metal alloys(Choudhari, Kulkarni et al. 2024).

During the interactions between the reinforced plastics and seawater, various phenomena come into play that reduce the life of the product. Based on the components of the composites, i.e., epoxy matrix, fibers and interfaces respond in various ways to the seawater chemical attacks(Ulus, Kaybal et al. 2022). The polar groups in the polymer are attacked by the infused water that initiates the hydrolysis process and weaken the inter-molecule forces. Additionally, due to the infiltration of the water molecules into the

interfaces, the interface debonding occurs(Wei, Cao et al. 2011). Moving further ahead, the exposure temperature/durations initiate attacking the reinforcement phases as well that respond as fiber/matrix delamination and fiber diameter reduction. In such cases, the form of the composite is damaged, as seen from the analysis of the failed Titan immersible.

In the class of composites, the fiber hybridized composites are referred to as the structures in which various types of fibers (such as Carbon/Basalt(Zafar and NaIr 2022), Basalt/Glass(Czigány 2006), Basalt/Flax(Petrucci, Santulli et al. 2013), Basalt/Kevlar(Wang, Hu et al. 2008)) are introduced into a single polymer matrix. While the idea of fiber hybridization was initially adopted for minimizing the fatigue crack growth(Asundi and Choi 1997), authors have explored the potential of hybrid composites for economical optimization(Chikhradze, Marquis et al.), flexure/impact improvement(Sarasini, Tirillò et al. 2014, Subagia, Kim et al. 2014), tensile testing(Sun, Tong et al. 2018), open hole compression analysis(Zhang, Zhang et al. 2011), and crack propagation(Wu, Wang et al. 2010).

Clearly, the hybrid composites have been proved to be financially more feasible without necessarily degrading the mechanical performance. Depending on the loading conditions, some layers of the expensive fibers are replaced with cheaper ones. It is well established that secondary fibers are either introduced for improved mechanical behavior or for economic considerations such that minimal degradation in properties is witnessed despite introduction of cheaper fibers in the composites(Asim, Jawaid et al. 2017).

However, the introduction of the secondary fibers must be strategic location-wise. The reason behind that is the change in the mechanical loading response of the hybrid composites depending on the location of the constituent fibers. Various authors have investigated the influence of various stacking sequences (B2C3B2, [C3B2]s, [C2B2C]s(Subagia, Kim et al. 2014), [BCBCBCBCBC]s, [C2BC2BC2BC]s, [B2CB2CB2CB]s(Dorigato and Pegoretti 2014), B3C7B3(Sarasini, Tirillò et al. 2014), [C5B10]s, [B7C9]s(Tirillò, Ferrante et al. 2017), [C4B4]s, [B4C4]s(Chen, Luo et al. 2019), [B2C2]s, and [C2B2]s(Chen, Sun et al. 2019) etc.) on the mechanical properties of the interply hybrid composites. While the non-hybridized composites have the matrix bonded from both sides with the same type of fibers, the hybridized composites give birth to interfaces of similar or dissimilar(alternate) types. For the Basalt-Carbon composites, these interfaces can be classified as similar(Zhang, Chaisombat et al. 2012, Khosravani, Anders et al. 2019) (Carbon-Carbon, C/C; Basalt-Basalt, B/B) and alternate (Basalt/Carbon, B/C) interfaces.

Based on the literature review and analysis of the failed real-life products clearly point to the significance of the inter-layer interfaces in determining the loading response in the challenging environments. The significance of the alternate interfaces is briefly complemented upon in the literature from the perspective of bridging effect(Khosravani, Anders et al. 2019). Ulus et al. (Ulus, Kaybal et al. 2022)reported that the adhesively bonded joints tend to show better corrosion/fatigue resistance, cohesion between dissimilar materials, weight saving and uniform stress distribution. However, bonding between dissimilar fibers causes formation of critical interfaces that might show degradation in challenging environment.

Titan submersible faced fatal impulsion under compressive loads of ~41 in the deep seawater at 3800 m in 2023. Although the final report is yet to be complied by the National Transportation Safety Board (NTSB), initial testimonies have identified delamination(Harris 2024), manufacturing flaws (porosity, curing etc.) (Patrick Whittle 2024)and most importantly interface failures (Mitchell 2023) for the impulsion. Especially, the titanium/carbon fiber composite interfaces and inter-fiber adhesive bond and fiber-fiber bond failures acted as critical point of failure.

During the loading of the alternate interfaces, the bridging effect comes into play when the ductile fibers with higher elongation-to-break ratios seize to deform because of the higher resistance to deformation of the other fiber(Cho, Oh et al. 2025). Comprehensive research where only the interfaces between the fabrics of hybrid composites are the governing parameters is yet to be conducted. However, our previous study (Zafar and NaIr 2022) detailed the correlation between the dynamic/static loading and B/C, B/C, and C/C interfaces. It was established that the interfaces, products of strategic stacking sequences, played a significant role in determining the damage degree, ductility index and tensile behavior of the Carbon-Basalt Hybrid composites.

Acoustic emission is a strong and comprehensive method with a wide range of application spectra, especially in the polymer matrix composite world. Acoustic emission method is widely used for comprehensive analysis of mechanical loading response of the polymer matrix composites(De Rosa, Santulli et al. 2009). The loading (tensile, quasi-static indentation etc.) causes failures of various types in the components of the composites such as matrix cracking, fiber breakage, fiber pullout, fiber-matrix delamination and inter-layer delamination. As a result of these failures, transient waves of different wave characteristics (Amplitude, frequency, duration etc.) are produced that can be monitored using sensitive microphones(Czigány 2006). Since the waves are derivatives of physical instances occurring within the composites as a result of loading-induced inter-component interactions, wave characteristics can be related to failure types(Zafar and NaIr 2022). In simple words, as a modern alternative to post-fracture analysis of the composites, acoustic emission enables understanding the material failures as they evolve during loading.

As mentioned above, enhancing the properties of reinforced plastics for submarine applications also directed engineers to explore the potential of the hybrid configurations. Abdurohman et al. (Abdurohman and Adhitya)studied the influence of water and seawater immersion on the tensile and compressive strength of conventional, hybrid, and sandwich fiber composites, including nanophased CFRP, E-glass/epoxy, flax/epoxy, CFRP-vinyl ester, and glass/epoxy pipes. The samples were exposed to long-term immersion (up to 12 months) in both pure water and seawater. Results showed that nanophased CFRP absorbed less moisture (0.39%) than conventional CFRP (0.67%) after 12 months in seawater, E-glass/epoxy lost 25% tensile strength in saturated conditions, flax/epoxy degraded by 15% (20 days) and 42% (30 days) in tap water, CFRPA suffered a 50% compressive strength reduction in seawater, and glass/epoxy pipes experienced an 84% strength loss after prolonged water exposure and thermal aging. Idrisi et al. (Idrisi, Mourad et al. 2021)investigated E-glass epoxy composite samples aged for 360 days in natural seawater at 23°C, 65°C, and 90°C. They found that degradation accelerated at 90°C, leading to fiber/matrix debonding. Seawater absorption increased at 23°C and 65°C but decreased at 90°C. Tensile strength was reduced by 1% (at 23°C) and 9% (at 65°C), with slight changes

in elastic modulus. Vizentin et al. (Vizentin, Glujić et al. 2021)reported on glass fiber with epoxy and polyester composites with different stacking configurations (multi-directional (0/90)s, and (0/45/90)s conditioned in a real seawater environment. Results showed reduction in tensile strength varying with stacking configuration, as well as mass gain from seawater moisture absorption and microorganism development. Glass fiber polyester composites with a $[0/45/90]_s$ layup demonstrated the highest resilience. Shreepannaga et al. (Kini and Pai 2022)reviewed the aging effects on static and dynamic mechanical properties of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites under marine environments and reported that saltwater environment is a critical concern, with the rate of degradation increasing with duration, temperature, and the alkalinity of the immersion solution. Komorek et al. (Komorek, Przybyłek et al. 2016)found that hybrid laminates with glass and carbon reinforcement had a 19% increased flexural strength relative to glass reinforcement when immersed in natural seawater for 36 days at 15°C. Anand et al. (Anand, Ghosh et al. 2020)studied hybrid composites of glass fiber and modified epoxy resin with 0.5 wt.% graphene oxide (GO) immersed in natural seawater at 30°C for 270 days, reporting lower seawater absorption and an improvement in flexural strength by 13% and modulus by 18% compared to pure glass fiber epoxy composites.

In this study, one configuration of intraply hybridized Carbon-Basalt fiber reinforced plastics were manufactured using VARTM method. The influence of seawater and distilled water exposure for 9 months was investigated using short beam shear test (ASTM D2344). The loading response was continuously monitored using acoustic emission signals.

Materials and Methods

Materials

The composites were based on carbon fibers, basalt fiber and epoxy resin and hardener, all acquired from Spinteks Inc., Turkey. Properties of the materials are given in Table 1. The design and the manufacturing method of the samples are already reported in the previous study(Zafar and NaIr 2022).

Table 1. Properties of the fabrics.

Fabric Types	Weight (g/cm^2)	Yarns (per cm)	Width (cm)	Yarn Fibers	Thickness (mm)
Basalt fabric	200 ± 10	5	100	Basalt	0.19 ± 5%
Carbon fabric	200 ± 10	5	100	Carbon	0.17 ± 5%
Carbon-basalt hybrid fabric	200 ± 15	5	100	Carbon, Basalt	0.18 ± 5%

Fiber Types	Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation to break (%)
Carbon Fiber	1.78	3800–4400	240	1.54
Basalt Fiber	2.6—2.8	2700–3000	93.1 – 110	3.10

Composite Design

There were two types of Carbon-Basalt Hybrid Composites manufactured in this study: Interply hybrids and Intraply hybrid. The interply hybridization is referred to as the stacking of different plies or fabrics in a laminate. Such type of hybridization is hybrid through thickness. On the other hand, the intraply hybridization is the arrangement in which within the ply or plane, two different types of fibers are used-carbon and basalt in our case situated at 0° and 90°. The details of the manufactured composite are given in **Table 2**. Additionally, total basalt and total carbon composites were also manufactured and subjected to same testing and analysis for comparison purposes. For the sake of simplicity, only HYB, Carbon and Basalt composites were tested in the study.

Table 2. Properties of the manufactured composites ((Zafar and NaIr 2022))

Configuration Name	Fiber Fraction	Carbon layers	Basalt layers	Stacking Sequences	Thickness (mm)	B/C interfaces	Similar Interface
1B1C	0.65 ± 0.01	12	12	[BCBCBCBCBCBC]s	4.6 ± 0.04	22	1 for C
2B2C	0.63 ± 0.02	12	12	[BBCCBBCCBBCC]s	4.8 ± 0.03	10	6 for B, 7 for C
3B3C	0.67 ± 0.01	12	12	[BBBCCCBBBCCC]s	4.7 ± 0.04	6	8 for B, 9 for C
HYB	0.62 ± 0.02	Intraply Hybrid	Intraply Hybrid	24 layers of intraply carbon-basalt fabrics	4.2 ± 0.05	-	-
C	0.64 ± 0.01	24	-	24 layers of total carbon fabric	4.4 ± 0.04	0	23 for C
B	0.67 ± 0.01	-	24	24 layers of total basalt fabric	4.7 ± 0.03	0	or B

Water/Seawater Immersion

Samples were immersed in the distilled water and seawater at room temperature from April-2024 to Jan-2025. At least three samples for each configuration were immersed in the water/seawater as shown in **Figure 1**(a-c). After the interval of every 3 months, 3 samples were carefully removed from the containers, weighed and carefully stored in a dry environment. The overall sample preparation and characterization methods are shown in the flowchart of **Figure 1**(d). Samples were tagged in the following fashion: stacking configuration name – immersion condition – immersion period

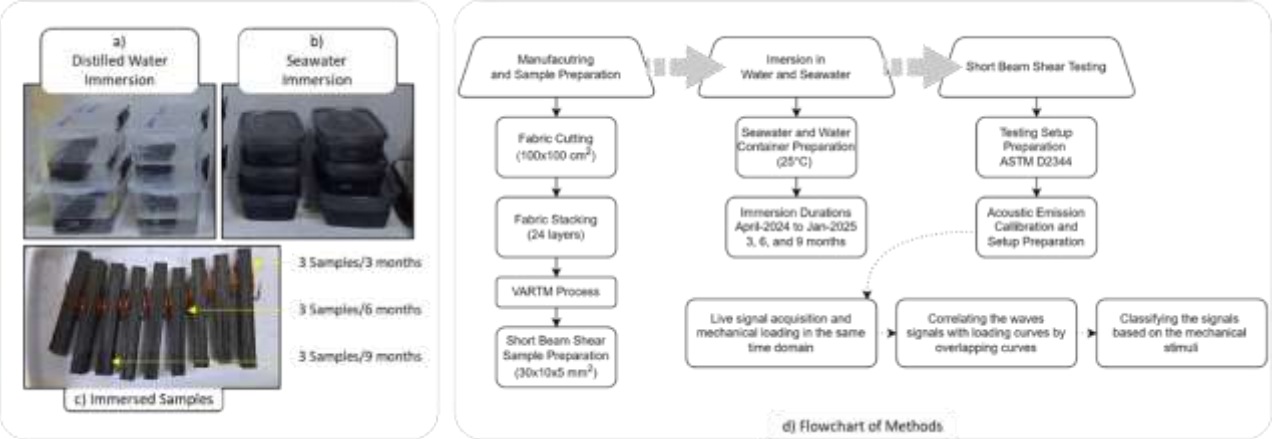


Figure 1. a-c) Immersion of hybrid and reference composites in the distilled water and seawater

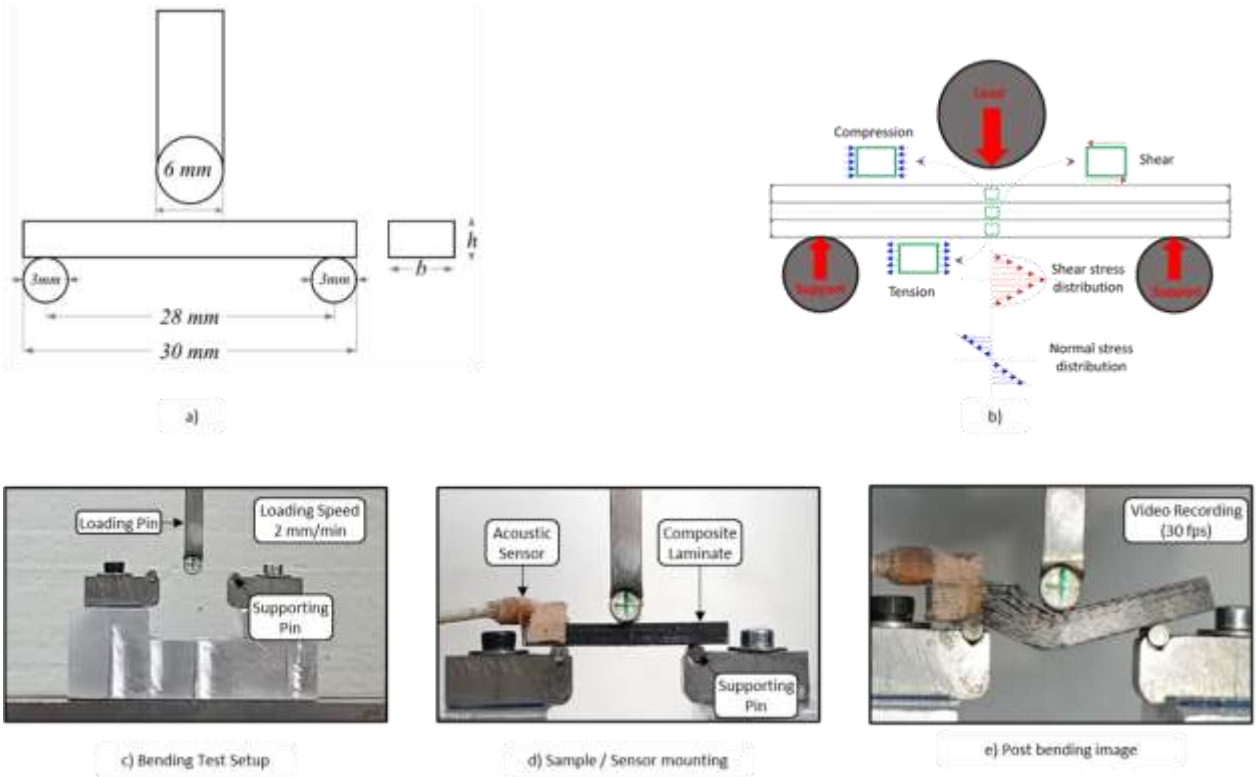
Short Beam Shear Testing

Due to the adhesively bonded nature of the laminates/fabrics, bending tests are widely used in the literature for testing the interlayer cohesion of the fiber reinforced composites(Costa, De Almeida et al. 2001). Bending tests are often preferred over tensile or compressive tests due to their simpler operation, easier apparatus setup, and overall convenience in calculating mechanical properties. In bending tests, beams (tested samples) are categorized into two types—short beams and long beams—based on their span-to-thickness ratio. The span refers to the distance between the two supporting rollers, while the thickness corresponds to the sample's thickness.

It has been reported by authors such as Greene et al. (Greene 2021)and Hodgkinson et al. (Hodgkinson 2012)that short beam shear testing (span-to-thickness ratio of less than 12) dominantly enforce shear stresses – an excellent method for scrutinizing the interface bonding. Authors also reiterated that limitations of short beam shearing tests since it may not provide a wide range of mechanical properties. Such a compromise is acceptable since the aim of the current project is to analyze the influence of the water/seawater immersion on the types (alternate/similar) interfaces in the manufactured composites.

Short shear tests were conducted based on the ASTM D2344 standards and loading was stopped the moment indenter crossed the depth of 4 mm (the thickness 4 mm) of the samples. The span-to-thickness ratio was set as (28/4=7) as shown in Figure 2. Tensile/Compressive stress in the top or bottom layer were calculated as $\sigma_x = 3PL/2bt^2$ and the shear stress in the laminate was determined by $\tau_{xy} = 3P/2bt$ where P, b, and t correspond to load, width, and thickness of the specimen. Tests were conducted in June at room temperature using MTS (100 kN) with loading speed of 2mm/minutes.

Figure 2. a, c-e) The short beam shear testing setup and b) stress conditions on the composite during bending



Acoustic Emission and Live Signal Monitoring

In this study, a two-channel acoustic emission (AE) system (MISTRAS Group, Inc.) was used to monitor failure events. The AE sensors (sensitivity: 35–100 dB, threshold: 35 dB, pre-amplification: 20 dB) were mounted directly on the test specimens. Acoustic waves generated during quasi-static loading-induced failures were carefully correlated with the corresponding shear-extension curves. Subsequently, the AE signals were analyzed by comparing the wave features such as counts (number of waves exceeding the threshold), durations (time between wave initiation and decay), and amplitudes for each type of hybrid composite.

The bending loads, acoustic emission signal monitoring and the video recording all start at t_0. Super positioning the related curves (loading curves with the acoustic emission data) in the same time domain enables correlation of mechanical loading responses with the emitted the acoustic waves.

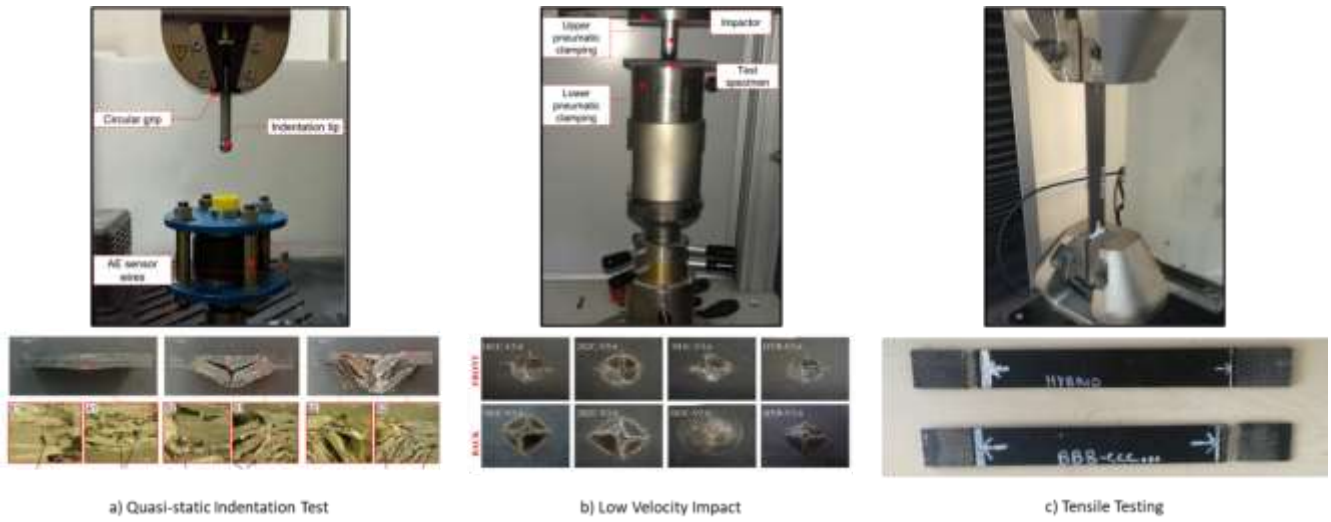


Figure 3. Mechanical loading tests conducted in the preivous study(Zafar and NaIr 2022)

Results and Discussion

Previous Study and Tensile, Impact, and Quasi-static Indentation Results

Table 3shows the summary of the three important mechanical tests conducted on the manufactured composites, the results of which are detailed in the previous study (see **Table 3**).

Table 3. Various properties of the manufactured composites as measured from tests conducted in the previous study.

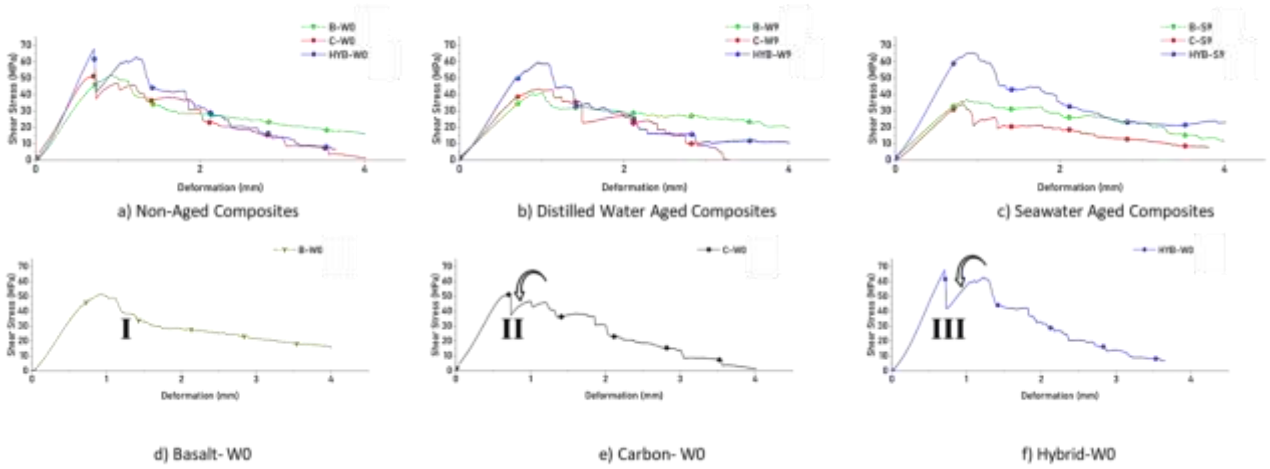
Property	HYB (Intraply)	C (Carbon)	B (Basalt)
Tensile Strength (MPa)	495 ± 8	440 ± 9	290 ± 14
Elongation at Break (%)	1.8 ± 0.1	1.5 ± 0.1	3.2 ± 0.3
Impact Energy (J)	24.7 ± 0.9	18.3 ± 0.8	42.5 ± 1.7
Damage Degree (DD)	0.65 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.88 ± 0.03
Ductility Index (DI)	1.12 ± 0.02	0.95 ± 0.02	1.62 ± 0.06

For reference, the results of the previous study showed that the interface bonding of the in-plane hybrid fabrics was better than the interfaces formed by the basalt fabrics. Additionally, the epoxy resin affinity of the carbon fibers compared to the less stronger basalt fibers contributed to formation of stronger interfaces wherever carbon was present in the fabrics. Consequently, while the damage absorption capacity of the carbon and hybrid composites was lower than the ductile basalt fibers, the tensile strength was not.

Influence of Hybridization on Loading Curves

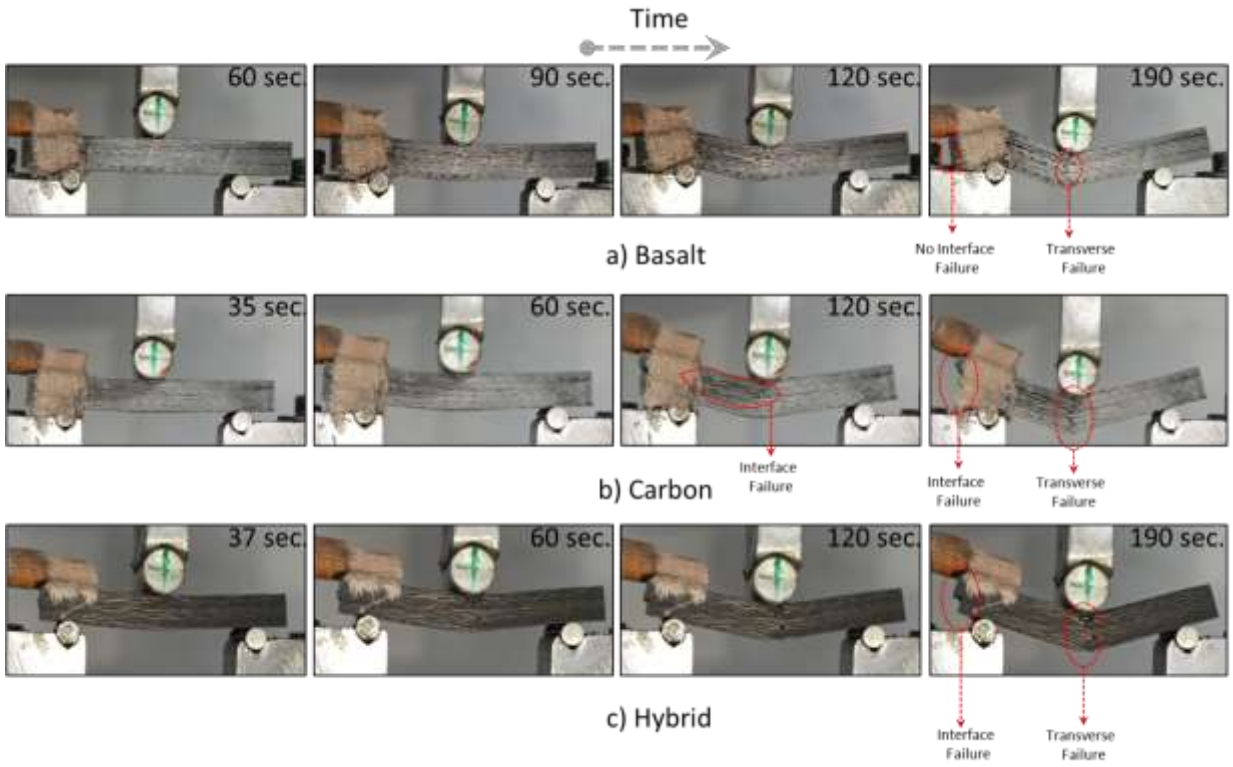
Figure 4 shows the shear stress-deformation profiles as acquired during the short-beam-bending test. All types of laminates are plotted separately but overlapped based on the aging conditions. At first glance, the immersion of hybrid composites in distilled water revealed distinct degradation patterns based on fiber architecture and interface types. The data extracted from these graphs and the derived values of both normal and shear strengths are given as the bar graph in **Figure 6**. The error bars are based on the standard deviation from the average values as gathered from three repetitions.

Figure 4. Comparison of composites' loading curves in different aging conditions (I: compliant deformation, II, III: sudden layer failure)



It can be seen in **Figure 4**(d-f) that the loading curve shows a sudden descend depending on how the elastic energy is released through the failures in the composite (arrows in **Figure 4**(e, f)) . If the interfaces of the plies are stronger, as is the case of the carbon fiber reinforced composite (C-W0) and hybrid composite (HYB-W0), such a sudden descend is prominently obvious. However, if the interfaces are not strongly bonded, the deformation keeps occurring but despite the enhanced shear stresses on the composite, neither sudden increase in the loading curve nor delamination occurs. This is the case for the Basalt reinforced composites because the loading curve decreases (**Figure 4**(d)) on the expense of normal loads perpendicular to the loading direction that cause transverse failures. **Figure 5** is prepared to show the screens shots of the video recording at important physical events during loading. It can be seen that for the basalt reinforced composites, the load is accumulated by the transverse failures dominantly controlled by fiber and matrix breakages and not by the interface delamination as shown with the timespan during bending loads in **Figure 5**(a).

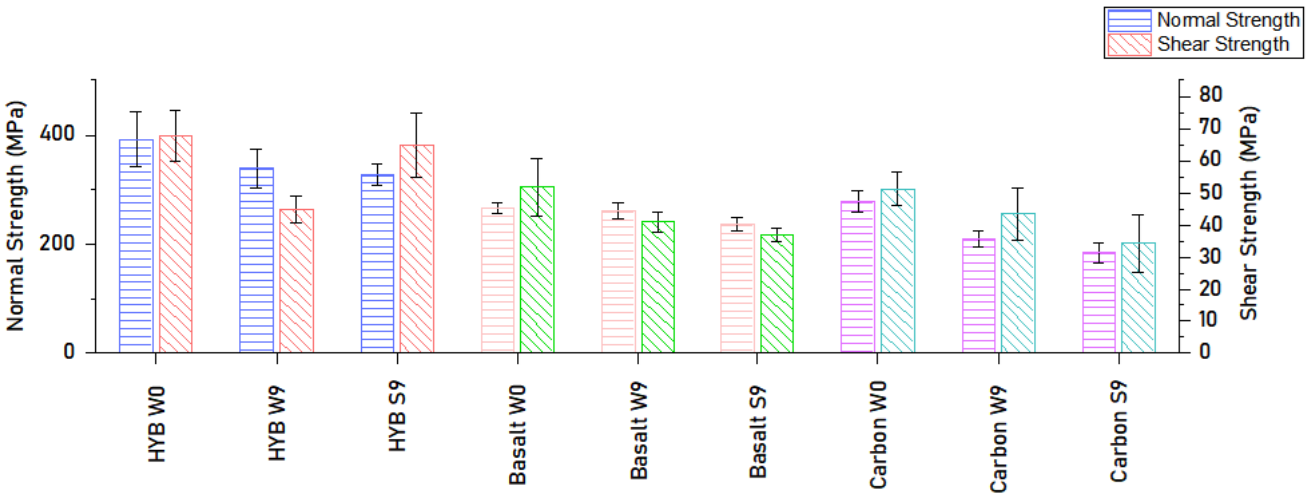
Figure 5. The screenshots from the video recording and the macroscopic mechanical/physical events during the bending test



Influence of Water/Sea Water immersion on Composites

Figure 6 shows the absolute shear and normal stress of the hybrid composite and the reference composites. It also shows the influence of the water and seawater absorption on the bending behavior of the composites after a period of 9 months.

Figure 6. Absolute shear and normal strength of the composites after the short-beam-bending tests



Clearly, the results show that the moisture infiltrates the interfaces that softens the composite after plasticizing the epoxy matrices. In the class of the intraply hybrids, the HYB configuration outperformed by showing minimal loss (8%) in the shear strength. As observed from the results of the tensile testing (see **Table 3**), the interfacial bonding of the in-plane hybrid fabrics is excellent compared to the reference composites. Indeed, such a result is the derivative of better bonding tendencies of the carbon fiber (Park and Jang 2001) present in each fabric that renders a stronger interface for HYB configuration. Consequently, the water infusion is reduced, and the plasticizing and softening tendencies also reduce.

Barreira et al. (Barreira-Pinto, Carneiro et al. 2023)detailed the influence of water exposure on various types of fiber reinforced composites such as Carbon/Glass hybrid(Shan and Liao 2002) and Carbon epoxy(Pérez-Pacheco, Cauich-Cupul et al. 2013) from the perspective of matrix-fiber interfacial adhesion.

For the class of the control specimens, total basalt and total carbon composites, basalt-only composites (B-W9) suffered the most severe degradation (~25% strength loss). In contrast, carbon-only composites (C-W9) were nearly unaffected (<5% loss), confirming carbon's hydrophobic nature. Such observations validate the aforementioned claims and agree with the data available in the literature. For example, Pérez et al. (Pérez-Pacheco, Cauich-Cupul et al. 2013)reported a loss of ~25% in the flexure strength as result of aging in different humidity conditions (25, 55, and 95 % at 25°C).

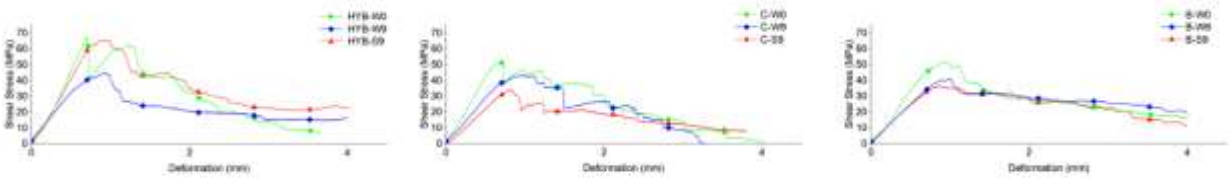
The influence of the seawater on the hybrid configuration was severe compared to the normal water. **Figure 7** compares the influence of different aging conditions on the short beam bending behavior of the composites. While HYB-S9 showed 15% strength loss, its failure mode shifted from fiber breakage (in dry conditions) to interfacial cracks along carbon-basalt yarns as shown in **Figure 5**(c). As for the controlled specimens, basalt composites (B-S9) degraded by 40%, with visible fiber pitting as shown in **Figure 5**(a) . On the other hand, carbon composites (C-S9) again showed resilience (<10% loss), though salt crystallization was observed in matrix pores. Such an observation assures that although carbon

fibers are resilient to distilled water through mechanisms of hindering the water absorption and matrix softening, the resistance to the seawater is degraded.

Figure 7. Influence of various aging conditions for each type of composites

AE Monitoring and Further Investigation

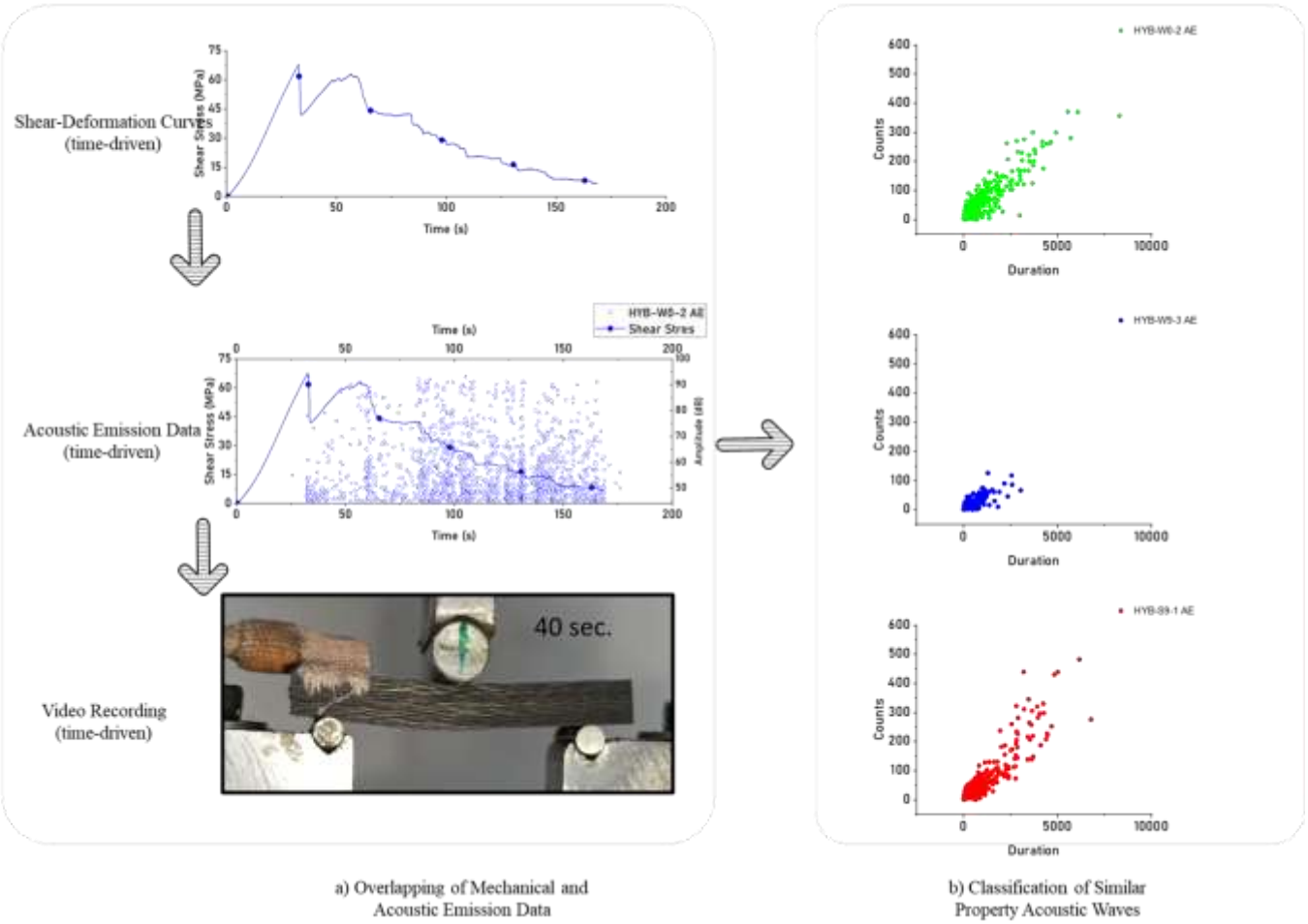
In this study, AE sensors were strategically placed on the specimens during short-beam shear testing



a) Hybrid Composite b) Carbon Composite c) Basalt Composite

to capture transient elastic waves generated by microstructural failures, such as matrix cracking, fiber breakage, and interfacial delamination. This approach allows for continuous monitoring of damage progression without interrupting mechanical testing, making it ideal for evaluating long-term degradation in hybrid composites exposed to seawater and distilled water.

It will require a separate dedicated project for understanding the influence of various stacking sequences and formation of different interfaces of the composites on the interlaminar shear strength. Further, the failure types must be correlated with the AE signal types by disintegrating the waves based on the wave characteristics. As a pilot study to see whether such a small specimen (30x10x4-6 mm^3) can be used for generating and monitoring acoustic signals, video recording, acoustic signals, and mechanical loadings were all conducted in a single time domain (see **Figure 8**) . Later, these occurrences were overlapped, and the time-driven data was correlated to scrutinize the shear strength of the interfaces. The results on a wide range of other hybrid configurations will be presented in a full-length article in further studies.



a) Overlapping of Mechanical and Acoustic Emission Data

b) Classification of Similar Property Acoustic Waves

Figure 8. Methods for using the acoustic and mechanical data for correlating the failures with the acoustic waves

Conclusion

The study analyzed the influence of in-plane hybridization of carbon and basalt for reinforcing resin epoxy composites on the stability in various aqueous conditions. Sample were immersed in the distilled water and seawater for a period of 9 months and the interfaces were assessed using short-beam-bending tests. Following conclusion from the study can be deduced.

1- Carbon-only (C) composites exhibited exceptional stability in both distilled water and seawater environments, with less than 10% strength reduction after 9 months of immersion. This resilience is attributed to carbon fibers' hydrophobic nature, which minimizes water absorption and prevents significant matrix plasticization.

2- Basalt-only (B) composites suffered severe degradation, losing 25% and 40% of their shear strength in distilled water and seawater, respectively. The hydrophilic basalt fibers absorbed moisture, leading to fiber swelling, matrix softening, and interfacial debonding.

3- The intraply hybrid (HYB) configuration displayed a balanced performance, with only 8% and 15% strength loss in distilled water and seawater, respectively. The uniform distribution of carbon

and basalt fibers in HYB restricted water infiltration while maintaining structural integrity. Although HYB outperformed pure basalt, its slight interfacial weakening in seawater suggests that further optimization—such as fiber sizing or resin modification—could enhance its durability for marine use.

References

Abdurohman, K. and M. Adhitya (2019) Effect of water and seawater on mechanical properties of fiber reinforced polymer composites: a review for amphibious aircraft float development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 694 (1) p. 012035 https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012035.

Anand, A., S. K. Ghosh and R. K. Prusty (2020) Effects of seawater absorption and desorption on the long-term creep performance of graphene oxide embedded glass fiber/epoxy composites. *Polymer Composites,* 41 (11) p. 4861-4871 https://doi.org/10.1002/pc.25758.

Asim, M., M. Jawaid, N. Saba, M. Nasir and M. T. H. Sultan (2017) Processing of hybrid polymer composites—a review. *Hybrid polymer composite materials*,p. 1-22 https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100789-1.00001-0.

Asundi, A. and A. Y. N. Choi (1997) Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft. *Journal of Materials processing technology,* 63 (1-3) p. 384-394 https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02652-0.

Barreira-Pinto, R., R. Carneiro, M. Miranda and R. M. Guedes (2023) "Polymer-Matrix Composites: Characterising the Impact of Environmental Factors on Their Lifetime." Materials **16** DOI: https://doi.org/10.3390/ma16113913.

Chen, D., Q. Luo, M. Meng, Q. Li and G. Sun (2019) Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres. *Composites Part B: Engineering,* 176 p. 107191 https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107191.

Chen, D., G. Sun, M. Meng, X. Jin and Q. Li (2019) Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates. *Thin-Walled Structures,* 142 p. 516-531 https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.056.

Chikhradze, N. M., F. D. S. Marquis, L. A. Japaridze, G. S. Abashidze and L. M. Okujava Polymer based composite and hybrid materials for wind power generation, Trans Tech Publ.

Cho, H.-J., S.-A. Oh and I.-G. Kim (2025) Traction-separation law for glass/epoxy composite laminates under mixed mode I/II loading condition considering the effects of fiber bridging. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics,* 136 p. 104739 https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104739.

Choudhari, P., V. Kulkarni and S. Khandal (2024) Review on Efforts to Improve the Mechanical Performance of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites Under the Marine Environment. *Journal of*

The Institution of Engineers (India): Series C, 105 (1) p. 241-269 https://doi.org/10.1007/s40032-023-01009-9.

Costa, M. L., S. f. M. De Almeida and M. C. Rezende (2001) The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates. *Composites Science and Technology,* 61 (14) p. 2101-2108 https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00157-9.

Czigány, T. (2006) Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: mechanical properties and acoustic emission study. *Composites science and technology,* 66 (16) p. 3210-3220 https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.007.

De Rosa, I. M., C. Santulli and F. Sarasini (2009) Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites: A literature review. *Composites part a: applied science and manufacturing,* 40 (9) p. 1456-1469 https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.030.

Dorigato, A. and A. Pegoretti (2014) Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates. *Journal of Composite Materials,* 48 (9) p. 1121-1130 https://doi.org/10.1177/0021998313482158.

Greene, J. P. (2021). Automotive plastics and composites: materials and processing, William Andrew.

Titan Submersible Hearings Spotlight Multiple Issues With Its Carbon Fiber Hull. 2024, from https://www.wired.com/story/titan-submersible-hearings-spotlight-multiple-issues-with-its-carbon-fiber-hull/.

Hodgkinson, J. M. (2012). Testing the strength and stiffness of polymer matrix composites. Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites, Elsevier**:** 129-182.

Idrisi, A. H., A.-H. I. Mourad, B. M. Abdel-Magid and B. Shivamurty (2021) Investigation on the durability of E-Glass/Epoxy composite exposed to seawater at elevated temperature. *Polymers,* 13 (13) p. 2182 https://doi.org/10.3390/polym13132182.

Khosravani, M. R., D. Anders and K. Weinberg (2019) Influence of strain rate on fracture behavior of sandwich composite T-joints. *European Journal of Mechanics-A/Solids,* 78 p. 103821.

Khosravani, M. R., D. Anders and K. Weinberg (2019) Influence of strain rate on fracture behavior of sandwich composite T-joints. *European Journal of Mechanics - A/Solids,* 78 p. 103821 https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.103821.

Kini, M. V. and D. Pai (2022) The ageing effect on static and dynamic mechanical properties of fibre reinforced polymer composites under marine environment-a review. *Materials Today: Proceedings,* 52 p. 689-696 https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.084.

Komorek, A., P. Przybyłek and W. Kucharczyk (2016) Effect of sea water and natural ageing on residual strength of epoxy laminates, reinforced with glass and carbon woven fabrics. *Advances in Materials Science and Engineering,* 2016 (1) p. 3754912 https://doi.org/10.1155/2016/3754912.

OceanGate Titan Submersible Failure: Consequences of Dodgy Engineering. Technical Analysis, from https://www.electropages.com/blog/2023/06/engineering-disaster-that-was-oceangate.

Park, R. and J. Jang (2001) Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: The effect of stacking sequence. *Polymer Composites,* 22 (1) p. 80-89 https://doi.org/10.1002/pc.10519.

Titan sub's carbon fiber hull showed flaws dating to manufacturing process, NTSB engineer says. from https://www.pbs.org/newshour/world/titan-subs-carbon-fiber-hull-showed-flaws-dating-to-manufacturing-process-ntsb-engineer-says.

Pérez-Pacheco, E., J. I. Cauich-Cupul, A. Valadez-González and P. J. Herrera-Franco (2013) Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. *Journal of materials science,* 48 p. 1873-1882 https://doi.org/10.1007/s10853-012-6947-4.

Petrucci, R., C. Santulli, D. Puglia, F. Sarasini, L. Torre and J. M. Kenny (2013) Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. *Materials & Design,* 49 p. 728-735 https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.014.

Sarasini, F., J. Tirillò, L. Ferrante, M. Valente, T. Valente, L. Lampani, P. Gaudenzi, S. Cioffi, S. Iannace and L. Sorrentino (2014) Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt–carbon/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering,* 59 p. 204-220 https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.12.006.

Shan, Y. and K. Liao (2002) Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass–carbon/epoxy hybrid composites. *International journal of fatigue,* 24 (8) p. 847-859 https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00210-9.

Subagia, I. D. G. A., Y. Kim, L. D. Tijing, C. S. Kim and H. K. Shon (2014) Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. *Composites Part B: Engineering,* 58 p. 251-258 https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.027.

Sun, G., S. Tong, D. Chen, Z. Gong and Q. Li (2018) Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers. *International Journal of Mechanical Sciences,* 148 p. 636-651 https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.007

Get rights and content.

Tirillò, J., L. Ferrante, F. Sarasini, L. Lampani, E. Barbero, S. Sánchez-Sáez, T. Valente and P. Gaudenzi (2017) High velocity impact behaviour of hybrid basalt-carbon/epoxy composites. *Composite Structures*, 168 p. 305-312 https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.039.

Ulus, H., H. B. Kaybal, F. Cacık, V. Eskizeybek and A. Avcı (2022) Fracture and dynamic mechanical analysis of seawater aged aluminum-BFRP hybrid adhesive joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 268 p. 108507 https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108507.

Vizentin, G., D. Glujić and V. Špada (2021) Effect of time-real marine environment exposure on the mechanical behavior of FRP composites. *Sustainability*, 13 (17) p. 9934 https://doi.org/10.3390/su13179934.

Wang, X., B. Hu, Y. Feng, F. Liang, J. Mo, J. Xiong and Y. Qiu (2008) Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. *Composites science and technology*, 68 (2) p. 444-450 https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.06.016

Get rights and content.

Wei, B., H. Cao and S. Song (2011) Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science*, 53 (1) p. 426-431 https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.053.

Wu, Z., X. Wang, K. Iwashita, T. Sasaki and Y. Hamaguchi (2010) Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, 41 (5) p. 396-402 https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.02.001.

Zafar, H. M. N. and F. NaIr (2022) Comparison of static/dynamic loading and tensile behavior of interply and intraply hybridized carbon/basalt epoxy composites. *Applied Composite Materials*,p. 1-22 https://doi.org/10.1007/s10443-021-09973-0.

Zhang, C. H., J. B. Zhang, M. C. Qu and J. N. Zhang (2011) Toughness properties of basalt/carbon fiber hybrid composites. *Advanced Materials Research*, 150 p. 732-735 https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.150-151.732.

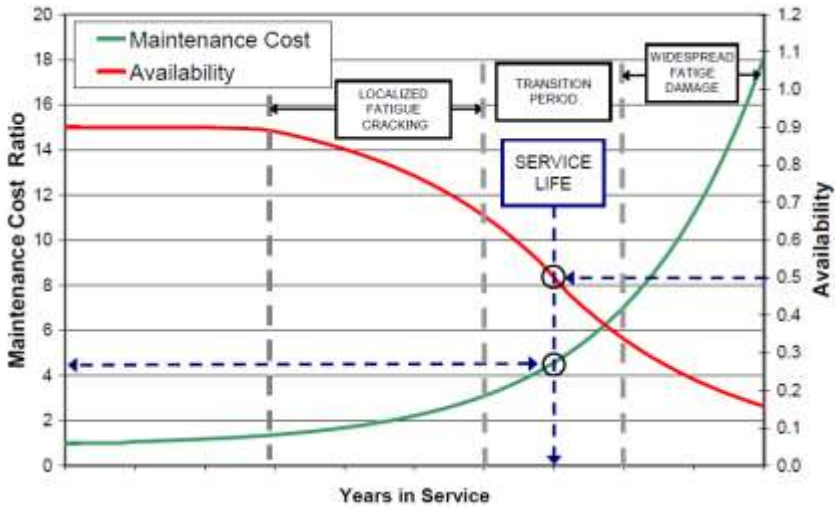
Zhang, J., K. Chaisombat, S. He and C. H. Wang (2012) Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials & Design (1980-2015)*, 36 p. 75-80 https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.006.

KAZA KIRIMLARIN ÖNLENMESİNE YÖNELİK UYGULANAN YAPISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Hazırlayan: Makina Y.Müh. Zekeriya KARADURMUŞ
Makine Müh.Bayram KARADURMUŞ

1. GİRİŞ

Yıllık ortalama 500 ila 600 arası uçak uçuştan çekilmektedir. Gelişen yapısal analiz yöntemlerine bağlı olarak uçakların kal ediliş zamanlarının yaklaşık olarak belirlenebilmesinden dolayı kullanıcı ülkeler eskiye nazaran uçaklarını uzun süre envanterde tutmaktadırlar. Bu durumda da yapısal analiz sonucu ortaya çıkan ilave bakım ve tadilatlar nedeniyle ülkelerin uçakları kullanım maliyetlerinde artışlar olmaktadır. Uçakların bakımda kaldıkları süre ile bakım maliyetler göz önüne alınarak kimi ülkeler filolarını yenilemekte, kimi ülkeler ise ilk yatırım maliyetlerinin fazlalığından dolayı ilave bakım ve kontrollerle uçaklarını uçurmaya devam etmektedir. Ekonomik olarak zengin olan ülkeler bakımlarda harcanan işçilikler ile uçakların yerde kalma süresinin değerlendirmelerini yaparak uçakları erken zamanlarda envanter dışına çıkarma yolunu seçerler. Diğerleri ise maksimum sürede envanterde tutacak şekilde çalışmalar ve ilave bakımlar yaparlar. Şekil 1'de uçaklara yönelik ekonomik servis ömrü verilmiştir.



Şekil 1. Ekonomik Servis Ömrü

2000'li yıllardan sonra uçaklarda ki yaşlanmayı uçuş profiline göre uçağın yorulması olarak ifade edilmeye başlanmıştır. Lockheed Martin Aeronautics Company (LMAC) tarafından yapılan Yaygın Yorulma Analizleri (Widespread Fatique Damage-WFD) sonucunda düşük uçuş saatli uçaklarda beklenmemesine rağmen kritik çatlaklar tespit edilmiştir. Böyle bir durumda uçuş profili, irtifası ve uçaktaki yük durumuna bağlı olarak Kritiklik Faktörü (Severity Factor) belirlenmiş, belirlenen kritiklik faktörüne bağlı olarak yeni uçuş saati hesaplamalarına geçilmiştir.

Genelde yaşlanan uçaklar tasarım ömrü varsayımlarının sonlarına yaklaşan çalışan uçaklar olarak tanımlanabilirler. Bir uçağın yaşına karar vermek her bir uçak bileşeninin farklı oranlarda yaşlanacağı gerçeğiyle daha da karmaşık bir hal almaktadır. Bundan dolayı 2000'li yıllardan sonra uçaklarda komponent bazlı hesaplamalar yapılmaya başlanmıştır.

Bir uçağın yaşlanması bir güvenlik zafiyeti olabilir fakat yeterli bakım ile yaşlanmanın sonuçları azaltılabilir. Yorulma gibi bazı yaşlanma mekanizmaları tekrarlayan veya döngüsel yüklemeler aracılığıyla oluşmaktadır. Yıpranma, bozulma ve korozyon gibi etkenler ise zaman içerisinde ortaya çıkmaktadırlar.

2. YAPISAL ANALİZ SÜRECİNİN GEÇMİŞİ

Motor ve pervane kullanılarak dünyada yapılan ilk uçak ABD'li Wright kardeşler tarafından yapılmıştır. Daha sonra 1909 yılında Fransız Louis tasarımını yaptığı uçakla 41 km uçmayı başarmıştır. 1923 yılında ise Vecihi Hürkuş tarafından Yunan uçaklarından kalan motorlarla ilk yerli ve milli Türk uçağını üretmeyi başarmıştır.

İlk uçak üretiminde kanvas kumaş ve tahta kullanılmıştır.1940 yılına gelindiğinde alüminyum alaşımlı monokok yapılar kullanılmaya başlanmıştır.

1930-1940 yılları arası "Yorulma" faktörü bilinmeden uçak gövde dizayn ve analiz çalışmaları ile geçmiştir. 1940-1955 yılları yorulma faktörü dikkate alınarak yüksek statik mukavemete sahip malzeme geliştirilmesi ile geçmiştir. 1955 yılından günümüze uçak üzerinde kullanılan parçalara testler uygulanarak Hasar-Tolerans (Durability and Damage Tolerance Analysis-DADTA) Analizlerinin yapılması, uçağa servis öncesi ve servis sırasında kontrollerin uygulanmasına rağmen uçak olaylarının önüne geçilememiştir.

1960'lı yılların sonuna kadar ağırlıklı olarak yapılarda 7075-T6 malzeme kullanılmaktaydı. Söz konusu malzeme stres korozyonuna karşı dayanıksızdı ve bundan dolayı özellikle kanatlarda stres korozyonuna bağlı olarak kopmalar meydana gelmekteydi. Bundan dolayı 1960'lı yıllar kaza kırım açısından yoğun geçmiştir. 1970'li yıllardan itibaren kritik yapılarda 7075-T73 kullanılmasıyla birlikte kaz kırımlarda ciddi oranlarda düşüşler yaşanmıştır.

2006 yılında California/ABD'de yangın söndürme görevi yapan ve Şekil 2'de gösterilen bir C-130 uçağında kanatların kopması nedeniyle uçak düşmüştür. Üretici tarafından kaza kırımın Merkez Kanat-Dış Kanat birleşimini sağlayan rainbow fittinginin kırılması sonucu olduğu açıklanmıştır. Ancak, kaza kırımların önüne geçilebilmesi için kontrol periyotları yeniden düzenlenmiştir. Özellikle rainbow fittinginin DADTA analizleri sık sık yapılarak kaza kırımların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.





Şekil 2. C-130 uçağında meydana Gelen Kaza Kırımın Görünümü

Uçaklar tasarım ömrü olarak da bilinen bir hizmet süresi için tasarlanmışlardır. Bu hizmet süresi içerisinde tasarımcılar tarafından belirlenmiş işlevselliğin, uçağın yapısının ve bileşenlerinin güvenle çalıştığından emin olunmalıdır. Üreticiler bir uçak tipini tasarım ömrü boyunca kullanıma dayanıklılığından emin olmak için test ve analize tabi tutarlar. Tasarım ömrünün aşımı bazı koşullarda mümkün olabilir ama bazı durumlarda ise uçağın bakım masrafı yeni bir uçak alımından fazlaya mal olabilir. Bu sebeple bir uçağın uçuş ömrü boyunca belli bir noktada uçmaya devam etmesi ekonomik açıdan uygun olmayabilir. Bu tasarım ömrünün "ekonomik" tasarım ömrü olarak adlandırılmasına sebep olmuştur.

3. YORULMA

Yorulma metal bileşenlerde oluşmakta olup, başlangıç noktası bir delik, çapak veya malzeme kusuru gibi yüksek stresli bir konumda oluşan mikroskobik bir çatlak olabilir. Yorulma bir bileşenin üzerine tekrarlı yüklemenin oluşturduğu döngüsel yükleme şekillerinde oluşmaktadır.

Yorulmanın bileşenlerin üzerindeki etkisi yorulma analizinin geçerli metotları ile miktarsal olarak hesaplanabilir. Matematiksel modelleme ile çatlağın büyüme oranını öngörebilmekte ve kırılmanın oluşabileceği çatlak boyutuna karar verilebilmektedir. Bu uzunluk kritik çatlak uzunluğu olarak da bilinmektedir. Bu tip yorulma analizi inceleme aralıkları ve/veya servisten alma zamanına karar vermekte kullanılabilir. Matematiksel model çatlağın büyüme ve kritik çatlak uzunluğu oranını öngörmek için uçağın tasarım ömrü üzerinde uçak üzerinde beklenen yükler ve yapı içerisindeki yük şeması bilgisini hesaba katmaktadır.

4. KOROZYON

Korozyon metalin bir kimyasal veya elektrokimyasal sebebiyle bozulmasının sonucu olarak ortaya çıkan zamana bağlı bir mekanizmadır.

Korozyonun oranını yavaşlatmak veya engellemek amacıyla korozyona dayanıklı malzeme seçimi, malzemenin kaplanması veya drenaj kullanılması gibi önlemler alınmıştır. Yorulma ve korozyon süreçleri yapısal arızaya sebep olma olasılığını artıracak şekilde birbirleriyle etkileşebilirler. Korozyon malzemeyi

zayıflatabilmekte ve gerilme odak noktaları yaratabilmektedir. Bu yüksek gerilme noktaları yorulma için başlangıç konumları olup, yapısal arızanın tahmin edildiğinden önce gerçekleşmesine sebep olabilirler. Şekil 3'te C-130 uçağında kanat ana yapısında meydana gelen korozyon görülmektedir.



Şekil 3. C-130 Uçağında Kanat Ana Yapısında Meydana Gelen Korozyon Görünümü.

Yorulma aynı zamanda arızanın belirlenmesinin zor olduğu beklenmeyen konumlarda da ortaya çıkabilir. Korozyon önemli bir güvenlik unsuru olmakla birlikte, yorulma ve korozyonun birleşimi korozyonun tek başına olduğundan daha büyük bir tehdittir.

5. UÇAK YAPISAL BÜTÜNLÜK ÇALIŞMALARI

1954 yılında 2 adet De Havilland Comet, 1958 yılında B-47, 1969 yılında General Dynamics F-111 uçaklarında yaşanan seri kayıplardan dolayı ASIP-UYBP (Aircraft Structural Integrity Program - Uçak Yapısal Bütünlük Programı) uygulamalarına başlanmıştır.

Uçak yapılarının ömür tayini ve dayanım limitlerinin tespitine yönelik yaklaşımlar uçak yapısal tasarımında da belirli değişikliklerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. ABD Hava Kuvvetleri tarafından ilk olarak 1958 yılında uygulanmaya başlanılan UYBP ile;

* Uçak yapısının bütünlüğünün kurulması, ve geliştirmesi,
* Harekât kullanım bilgilerinin toplanması,
* Kuvvet yapısı değerlendirme, lojistik planlama gibi ihtiyaçlar için veri tabanı oluşturması hefeflenmiştir.

a. Safe Life (Güvenli Ömür)

"Güvenli Ömür" yaklaşımının hedefi, uçağın servis ömrü olarak öngörülen sürede yapısında çatlak oluşmayacak şekilde tasarlanmasıdır. İlk uçak imal edildikten sonra tam ölçekli test uygulanır.

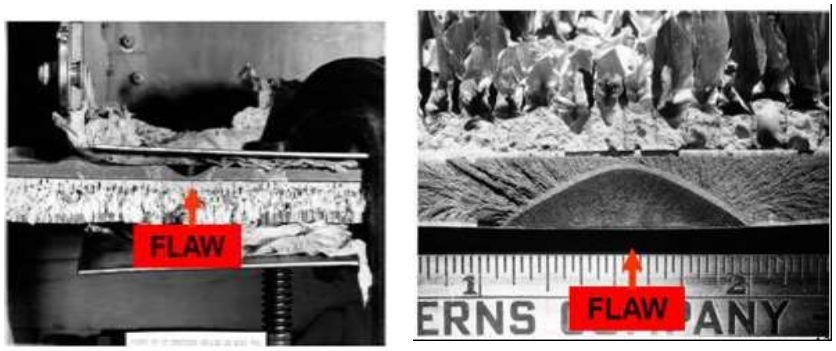
F-111, zamanın gereği olarak "Güvenli Ömür" yaklaşımıyla tasarlanmış bir uçak olup, buna göre 4.000 U/S'lik bir ömre sahip olduğu belirtilmiştir. Yani yaklaşık 16.000 saat laboratuvar testlerine tabi tutulmuş ve böylece 4.000 saat boyunca yapıda çatlak oluşmayacağı ispatlanmaya çalışılmıştır.

Ancak, 1969 yılında seri F-111 kazaları, kaza nedenlerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması zorunluluğunu ortaya koymuştur. Şekil 4'de kaza kırımın görüntüsü, Şekil 5'de ise detay görünümü verilmiştir.



Şekil 4. Kaza Kırımın Görüntüsü

Yapılan incelemelerde kazaların yapısal aksaklıklar nedeniyle meydana geldiği tespit edilmiştir. Kazalarda, kanat-gövde bağlantısını sağlayan fitting kırılmış ve bu da kanadın kopmasına ve uçağın kaybına sebep olmuştur.



Şekil 5. Kopan Fittingin Detay Görünümü

b. Hasar Tolerans Analizi (Durability And Damage Tolerance Analysis-DADTA)

DADTA, çatlak büyüme analizi ile uçakların güvenli uçuş ömrünün tahmin edilmesini ve bu bilgiler dahilinde uçuş güvenliğini artırılmasını sağlayan kapsamlı bir programdır. Hasar Tolerans yaklaşımının ilk büyük örneği, 1970'li yıllarda gerçekleştirilen F-111 programıdır.

1971 ve 1972 yıllarında ise, başlangıç çatlak boyları konseptine önem verilmeye başlanılmıştır. Buradaki amaç, parçanın imalatı esnasında yapıda oluşturulduğu varsayılan çatlak boyutunu temsil eden değerin bulunmasıdır.

1973 yılında F-4, 1974 yılında ise A-7 hasar tolerans çalışmaları başlatılmış, F-4 çalışması esnasında yorulma testlerinden elde edilen 132 adet parça fraktografik ve analitik tekniklerle analiz edilerek başlangıç çatlak boyutları elde edilmeye çalışılmıştır. A-7 çalışmasında ise parçalar tekrarlı yükler altında test edilmiş ve başlangıç çatlak boyutları belirlenmeye çalışılmıştır.

Uçakların uçuş emniyeti açısından herhangi bir risk altında olmaması amacıyla da bazı çalışmalar yapılmaktadır. ASIP' te tanımlanan bu çalışmalardan en önemlileri;

* Individual Aircraft Tracking Program (IATP)
* Analytical Condition Inspection (ACI)

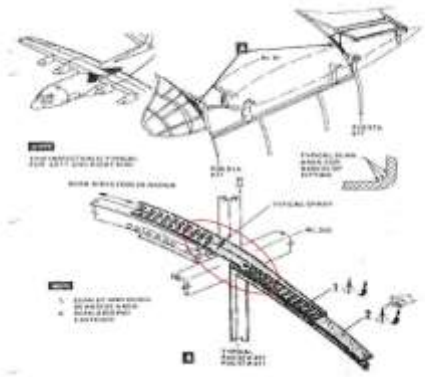
* Teardown Inspection olarak verilebilir.

(1) Individual Aircraft Tracking Program (IATP): Üreticinin kullanım sırasında ortaya çıkabilecek yapısal aksaklıkların önceden tespit edilmesine yönelik belirli bir konfigürasyondaki uçağı hızlı yaşlandırmaya tabi tutması amacıyla yoğun olarak uçuşa planlayıp kuyruk numarası bazında takip ederek ya da farklı kullanım konseptine ve farklı kullanım koşullarına sahip operatörlerden istifade ederek yapılacak kontrol ve bakımlardan veri toplaması çalışmalarıdır.

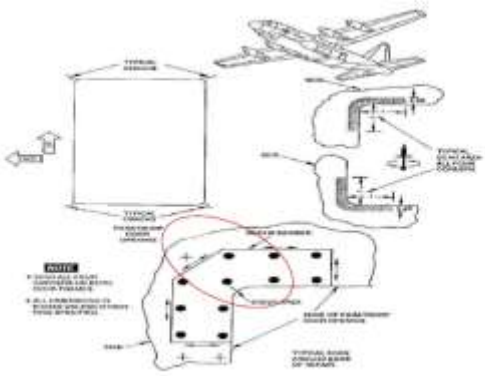
(2) Analytical Condition Inspection(ACI): Individual Aircraft Tracking Programlarından elde edilen veriler ışığında korozyon, fatigue yada diğer yapısal hasar senaryoları oluşturularak belirlenen bölgelere, yine bu yolla belirlenen aralıklarda kontroller uygulanmasıdır. Sürekli bir faaliyet olarak yürütülür. Yapısal tamirlerden sonra da yapılan tamiratın etkinliğini değerlendirmek üzere yapılan kontroller de bu kapsamdadır.

Benzer uygulamalar Hv.K.K.lığında bulunan kargo uçaklarında da yapılmıştır. Üretici firmadan elde edilen veriler ve bakımlar esnasında tespit edilen bulgular doğrultusunda C-130 uçaklarından başlamak üzere uçaklar analitik kontrole tabi tutulmuştur. Özellikle kontrol için uçuş saati baz alınmıştır. 30.000 Eşdeğer Uçuş Saatinin üzerinde uçaklar belirlenmiştir. Yapılan kontrollerde özellikle bakım konseptlerinde yer almayan ve uçuş emniyetini doğrudan etkileyen bölgeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda ilk iki uçakta 53 değişik bölgenin NDI kontrolünü içeren Analitik Kontrol Paketi hazırlanmıştır.

Yapılan kontrollerde, gövde istasyonları (FS) 477-617 arasındaki (Şekil 6) "bulkhead cap"de ve FS 737'deki (Şekil 7) "paraşütçü kapı eşiği kenarı"nda iki çatlak tespit edilmiştir.



Şekil 6. FS 477-617 gövde istasyonları arasında yer alan "Bulkhead cap"

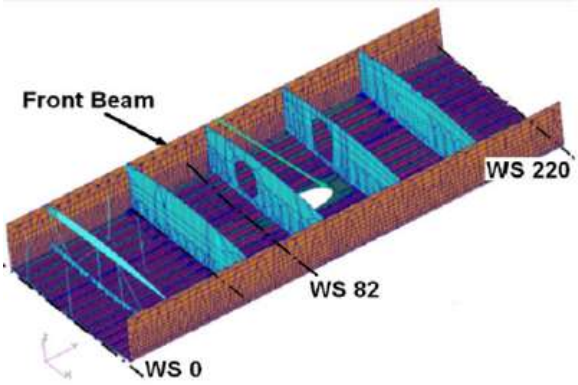


Şekil 7. FS 737 istasyonunda bulunan "Paraşütçü kapısı eşiğinin kenarı"

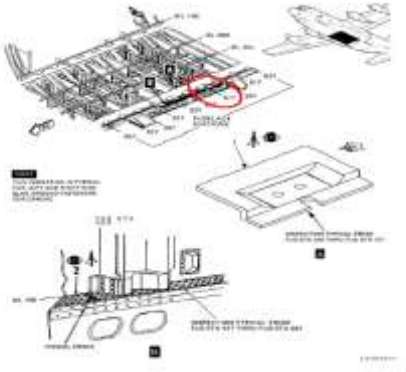
İkinci uçakta ise merkez kanat istasyonu (WS) 82 (Şekil 8)'de yer alan "ön beam" te bir çatlak belirlenmiştir.

Sert iniş yaptığı öngörülen ve uçuş öncesi yapılan kontrollerde ana iniş takımı ile gövde arasında bulunan "web"de yırtık tespit edilen başka bir uçağa yönelik 11 adetlik bir analitik kontrol paketi hazırlanmıştır.

Yapılan kontrollerde FS255 gövdede yer alan “chine cap”de, sağ ve sol ana iniş takımları “self cut-out”da (Şekil 9) 3 adet çatlak bulunmuştur.



Şekil 8. WS 82 merkez kanat istasyonunda yer alan “Ön kiriş”



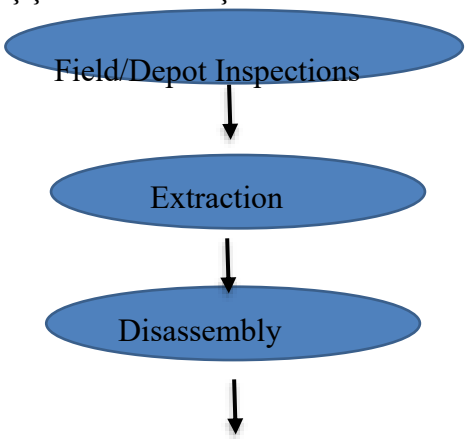
Şekil 9. FS 255’in gövdesinde yer alan “Chine cap”

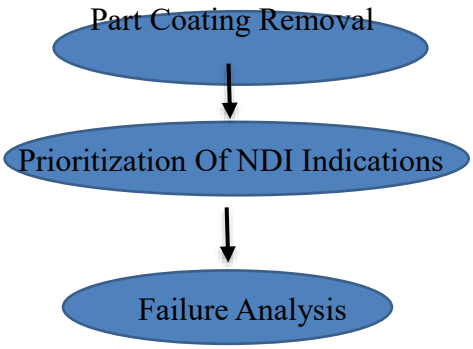
Analitik kontroller esnasında edinilen tecrübelerin sonucu olarak, filodaki tüm C-130 uçaklarını kontrol etmek üzere iki adet TCTO hazırlanmış ve yayınlanmıştır. 2’nci Hv.Bkm.Fb.Md.lüğü tarafından gerçekleştirilen Analitik Kontrol çalışmalarının Türk Hava Kuvvetlerinin yaşlanmakta olan C-130 filosunun uçuç güvenliği üzerinde kayda değer etkilere sahip olduğu değerlendirilmektedir.

(3) Teardown Inspection: Tasarlanmış servis ömürlerinin ötesinde kullanılması beklenen uçaklar için detay sökümlerinden sonra aksaklıkların tespit edilmesi, bu aksaklıkların oluşma ve gelişme mekanizmaları ve sebeplerinin belirlenmesi amacıyla “teardown analysis” uygulanmaya başlanmıştır.

Uçakta yapısal bütünlüğün korunması için sorunlu olduğu değerlendirilen bölgelerin teardown analizi ile ortaya çıkarılması ve bu doğrultuda bakım paketlerinin güncellenerek yaşlanan uçakların yapısal bütünlüğünün korunması hedeflenmiştir.

Teardown analizi ile yapının sökülerek NDI veya göz kontrolü ile hasarın derecesini belirlemek, bir yapı içerisinde var olan yorulma, korozyon veya kazara oluşan hasarı tespit etmek amaçlanmıştır. Şekil 10’da teardown analizi akış şeması verilmiştir.





Şekil 10. Teardown Analizi Akış Şeması

2000'li yıllardan itibaren C-130 uçaklarında merkez kanatlarda tespit edilen bazı çatlaklar nedeniyle uçağın kullanım ömrünün belirlenme ihtiyacı doğmuştur. Bu konuda firmalar tarafından çalışmalar yapılmıştır.

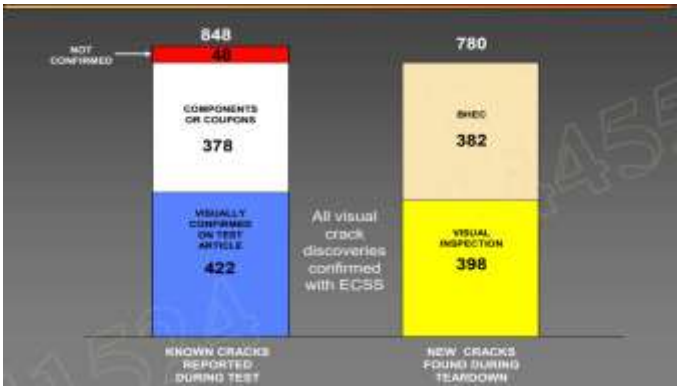
Bu doğrultuda, 60.000 simüle edilmiş uçuş saati kullanılmıştır. Uygulama için FY73 tipi C-130H uçağı kanadı belirlenmiştir. Kanatta bulunan 44.000 uçuş saatinde genelleşmiş çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Uygulamaya devam edebilmek için bazı çatlak parçalar değiştirilmiştir. Test boyunca ve testin sonunda komponentler sökülmüştür. Yapılan bu çalışmada;

Tüm komponentlerin NDI ve göz kontrolüne tabi tutulması,

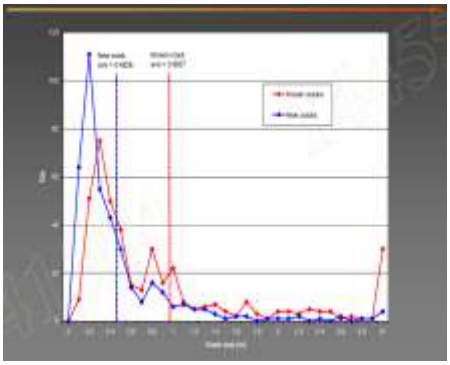
* Doğru çatlak uzunluğunun elde edilmesi,
* Var olan çatlakların fotoğraflı belgesinin alınması,
* Çok bölgeli hasar (multi-site damage-MSD) ile çok elementli (multi-element damage MED) hasar alanlarının belirlenmesi, amaçlanmıştır.

Faz 1 çalışması kapsamında 43.172 adet bağlayıcının tamamı sökülmüştür. Tüm boya ve macun kazınmıştır. Test sırasında rapor edilen kusurların yeniden tanımlanması, ölçülmesi, fotoğraflanması ve kaydedilmesi amacıyla tüm komponentler göz kontrolüne tabi tutulmuştur.

Faz 2 çalışması kapsamında "spar cap"ler, "web"ler, "splice"lardaki paneller, "engine drag angle"lar ve "drain" kanallarında bulunan 28.700 deliğin Cıvata Deliği Eddy Current (BHEC) kontrolleri, corner fitting ile rainbow fittinglerin Penetrant kontrolleri ile 500 adet komponentin "fragtographic" kontrolleri yapılmıştır. Testler boyunca tespit edilen çatlak bilgileri Şekil 11'de, çatlak boyutları ise Şekil 12'de verilmiştir.

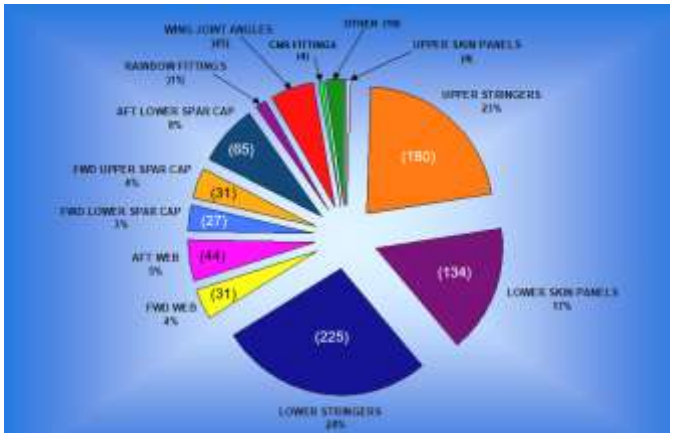


Şekil 11. Yorulma çatlağı Miktarları



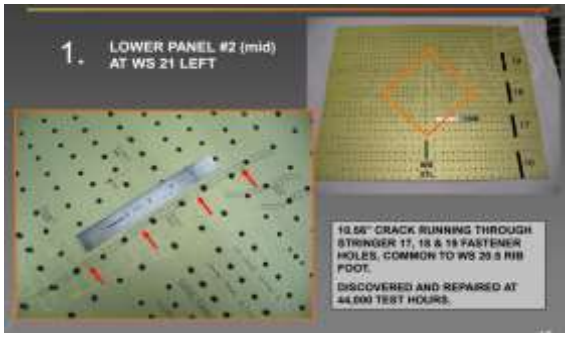
Şekil 12. Çatlak Boyutları

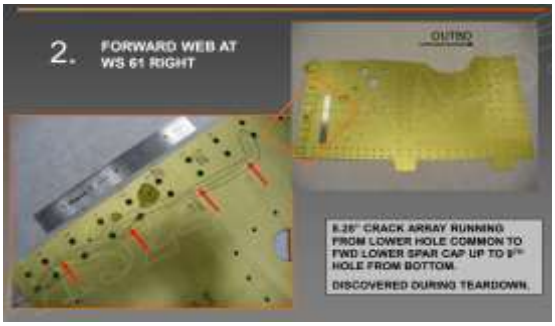
Çatlak detayları ise Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Teardown Çatlak Detayları

44.000 uçuş saatinde WS 21'de bulunan sol alt panelde 10.56 inç uzunluğunda, teardown boyunca WS 61 sağ ön "web"de 8.25 inç uzunluğunda çatlak tespit edilmiştir. (Şekil 14)





Şekil 14. Çatlak Detayları

59.000 uçuş saatinde WS 182 sağ taraf "aft web"de 7.3 inç uzunluğunda çatlak, 44.000 uçuş saatinde WS 15.8 sol taraf 17 numaralı alt "stringer"de ve WS 21 sol taraf 18 numaralı alt "stringer"de kırılmalar tespit edilmiş olup, Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Çatlak Detayları

Alt yüzey "stringer"lerde MSD çatlakları tespit edilmiş olup, Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. MSD Çatlağı

Buna ilaveten L3 firması 2005 yılında C-130 uçakları merkez kanatlarına Teardown uygulaması yapmıştır.

Yapılan analiz kapsamında;

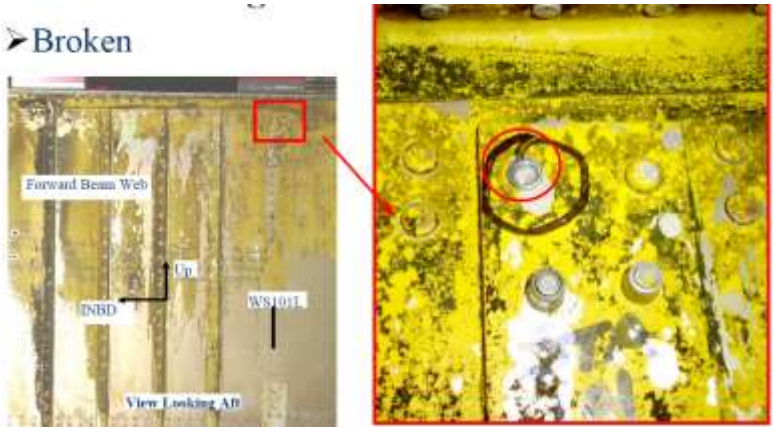
- Uçuş saati 22.200 ve EFH değeri 51.600 olan,
- 1970 yılında kanat güçlendirilmesini içeren 1C-130-819 uygulanmış,
- 1963 model bir uçak belirlenmiştir.

Analiz sonucunda 512 adet korozyonlu bağlayıcı belirlenmiş olup, korozyon detayları Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Korozyon Detayları

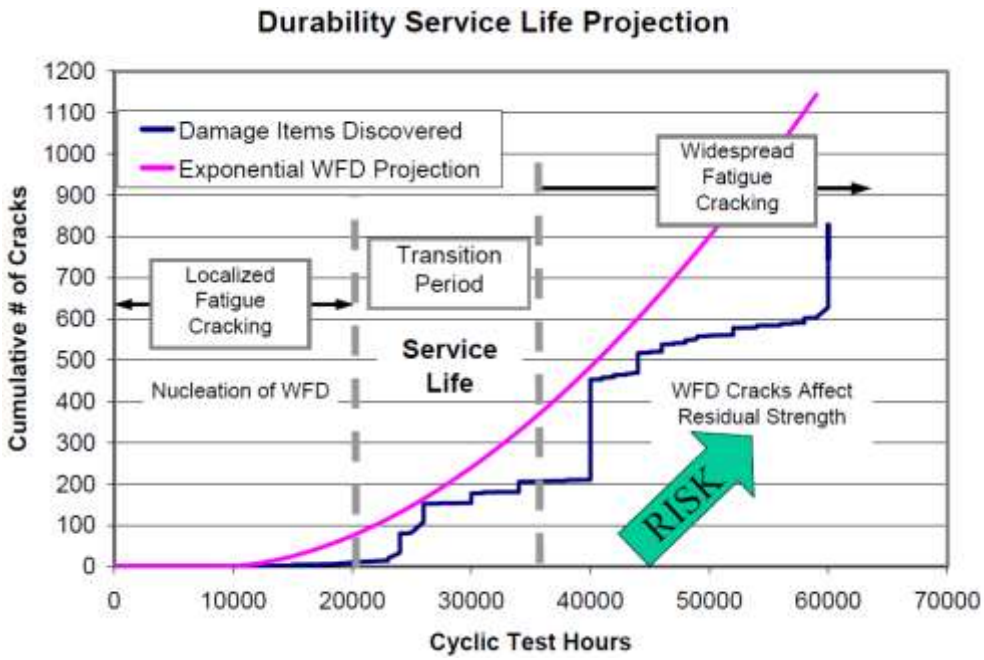
26 adet kırık bağlayıcı tespit edilmiş olup detayları Şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 18. Kırık Bağlayıcı Detayları

675 adet çatlak tespit edilmiştir. Bunlardan 192 adedinin boyu belirlenebilirken 483 adet çatlağın boyu belirlenemeyecek kadar küçük olduğu görülmüştür. Çatlakların büyük bir çoğunluğunun alt kanat yüzeyleri ile ön ve arka sparlarda olduğu görülmüştür.

Yapılan bu çalışmalar ile MSD ve MED çatlak detaylarının belirlenmesi, bulgular ve çatlak ilerleme durumları ve çatlak miktarına göre kanadın güvenli ömrünün hesaplanması hedeflenmiştir. Şekil 19'da Dayanıklı Hizmet Ömrü Grafiği verilmiştir.



Şekil 19. Dayanıklı Hizmet Ömrü Grafiği

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Yaşlanan uçakların yapısal durumlarının sürekli bir faaliyet olarak takip edilmesi, uçuş emniyetinin sağlanması açısından hayati öneme sahiptir. Uçaklarını uzun süre envanterde tutmayı planlayan ülkelerin özellikle ASIP, Teardown, WFD ve benzeri gibi yapısal analiz çalışmalarını kayıt altına alarak bir yapısal analiz bilgi tabanı oluşturmalıdır. Bu sayede üretici firma uçaklarını envanterden çekse bile var olan analizlerle uçaklar daha uzun bir süre envanterde kalabileceği değerlendirilmektedir.

Ülkeler uçaklarını daha güvenli uçurabilmek için sürekli çaba göstermektedir. Buna paralel olarak 2'nci Hv.Bkm.Fb.Md.lüğü tarafından C-130 Uçakları Analitik Kontrol Programı geliştirilerek uygulanmaya konulmuş olup, aynı uygulama envanterde bulunan diğer uçaklara yaygınlaştırılmıştır. Uygulama sonucu elde edilen veriler ışığından bakım paketleri güncellenmiştir.

Analitik Kontrol Programından elde edilen veriler doğrultusunda, Türk Hava Kuvvetlerinin sahip olduğu C-130 filosunda bulunan uçakların uçuş saatleri ve EFH değerleri takip edilmekte, ortaya çıkan analiz sonuçlarına göre ZABATE hazırlanarak gerekli bakım/onarım/tadilat/değişim işlemleri yapılmakta ve uçak tipine göre FASBAT bakım paketi güncellenerek etkin bir uçuş güvenliği sağlanmaya çalışılmaktadır.

Teardown Kontrol uygulamasının uçakların kalan ömrünün belirlenmesi konusuna ışık tutacak bir çalışma olmamasına rağmen uçakların parçalanarak incelenmesi nedeniyle uçak bileşenlerinin derinlemesine kontrol imkanını artıracağı, korozyon tespiti açısından daha geniş değerlendirme şansı sağlayacağı, uçak yapısında tespit edilen çatlakların metalürjik incelemesi ile çatlak başlangıç mekanizmasının incelenme imkanını sağlayacağı değerlendirilmiştir.

Uçakların bakım uygulamaları yapılan analizler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanmaktadır. Kullanıcı ülkeler yapısal analiz verilerinden elde edilen bilgiler ışığında kendi bakım paketlerini hazırlayabilir ve aynı zamanda günceliğini sağlayabilir.

Yaşlı uçakların en düşük risk seviyesi ile uçuşlarına devam edebilmesi bakımından gerçekleştirilen ASIP çalışmaların yakından takip edilmesi ile edinilen bilgi ve veriler ışığında gerekli kontrollerin yapılmasının kritik derecede önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Kaynakça:

[1] Lincoln, J.W. (2001) Managing the Aging Aircraft Problem, RTO AVT Specialists' Meeting on Life Management Techniques for Ageing Air Vehicles, Manchester, United Kingdom, 8-11 Oct 2001.

[2] ATSB Aviation Research and Analysis Report – B20050205 (2007) How Old is Too Old? The impact of aging aircraft on aviation safety, Australian Transport Safety Bureau, PO Box 967, Civic Square ACT 2008.

[3] Blech, G. (2000) Aging Aircraft Subsystems Equipment Life Extension within the Tornado Program, RTO AVT Lecture Series on Aging Engines, Avionics, Subsystems and Helicopters, Atlantic City, USA, 23-24 Oct 2000.

[4] Service Bulletin 82-790 (2005) Wing-Operational Usage Evaluation and Service Life Assessment, Lockheed Martin Aeronautics Company Marietta, Georgia, 2005.

[5] Karadurmuş, Z. (2012) C-130 Uçaklarına Uygulanan Analitik Kontroller, TR-TY12-046 Kontrol Numaralı Teknik Rapor, 2'nci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı, Kayseri, Nisan 2012.

[6] Bradd Lloyd, (2006) C-130 Center Wing Teardown Programs, Hercules Operator Conference, 2007

[7] Melinda Laubach-Hock (2011) Structural Teardown And Analysis: Evoluation Of The Teardown Process, Wichita State Unicersity, 2003

[8] MIL-STD-1530D, Department Of Defence Standard Practıce: Aircraft Structural Integrity Program (ASIP), 2016

[9] Cristiansen, P. C-130 Center Wing MSD/MED Risk Analysis WR/ALC, 2006

RASTGELE BOYUTLU İHA SÜRÜLERİNDE HEDEF TESPİTİ İÇİN UYARLANABİLİR STOKASTİK MEKANİZMALAR: MERKEZİYETSİZLİK VE KESİNLİK ARASINDA BİR KÖPRÜ

Uğur POLAT

Öğretim Görevlisi, KTO Karatay Üniversitesi, Ticaret ve Sanayi Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Programı, Konya -Türkiye **(**Sorumlu Yazar) ORCID: 0000-0002-9526-1945

Ahmet AVCI

Profesör, KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Programı, Konya - Türkiye, ORCID: 0000-0002-1946-6260

Ahmet Mete VURAL

Profesör, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı, Gaziantep - Türkiye, ORCID: 0000-0003-2543-4019

Özet

Bu makale, zorlu ortamlarda faaliyet gösteren İnsansız Hava Aracı (İHA) sürüleri için yeni bir koordinasyon stratejisi olan Uyarlanabilir Markov Kümeleme (ARW-MC) algoritmasını kullanmaktadır. Biyolojik olarak esinlenilen kolektif parçacık toplama davranışlarını, özellikle kurtlarda görülen parçacık toplamayı, kuantumla geliştirilmiş stokastiklik ve Markov kümelemesiyle birleştirerek, ARW-MC İHA'ların dinamik olarak kendi kendini organize etmesini ve gerçek zamanlı olarak çevre koşullarına adapte olmasını sağlamaktadır. Bu hibrit mekanizma görev dağılımını iyileştirerek, uyarlanabilir hız modülasyonu yoluyla enerji verimliliğini %35'e kadar artırır ve yanlış pozitifleri (klasik PSO'ya kıyasla %80'e kadar) ve yedekli taramaları (%60) önemli ölçüde azaltır.

Deneysel sonuçlar, 500'e kadar İHA'dan oluşan sürüler için yüksek tespit doğruluğu (%89'a kadar) ve doğrusal ölçeklenebilirlik göstermektedir. ARW-MC çerçevesi, rastgeleliği etkili bir şekilde yapılandırılmış bir mekanizmaya dönüştürerek, merkezi olmayan sistemlerin mayın temizleme ve altyapı denetimi gibi zamana duyarlı uygulamalar için uygun yüksek hassasiyete ulaşmasını sağlar. ARW-MC, yapılandırılmış rastgeleliği etkili bir şekilde kullanıp çevresel belirsizliği operasyonel bir mekanizmaya dönüştürerek gelişmiş hassasiyet ve kaynak kullanımıyla merkezi olmayan karar vermeyi kolaylaştırır. Gelecekteki çalışmalara baktığımızda ARW-MC İHA'lara ağdaki iletişim gecikmesini azaltarak işleme verimliliğini daha da artırmak için 5G/6G ağları ve uç bilgi işlem altyapılarıyla entegre etmeyi, genelleştirilmiş öğrenme için sinir ağlarını keşfetmeyi ve otonom sürülerin sivil uygulamaları için yönetişim protokolleri geliştirmeyi öneriyoruz. Bu çalışma, biyolojik ilham ile kuantum bilişim arasındaki boşluğu kapatarak karmaşık senaryolarda gelişmiş otonom sistemleri geliştirmek için bir yol aralamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Sözcükler: Uyarlanabilir Markov Kümeleme (ARW-MC), Kuantumla geliştirilmiş sürü zekâsı, Merkezi olmayan hedef tespiti, Biyolojik İHA koordinasyonu, Enerji açısından verimli sürü navigasyonu, İHA'larda stokastik optimizasyon

Introduction

The evolution of UAV swarms represents a paradigm shift in autonomous systems for defense, disaster response, and infrastructure monitoring. Traditional swarm coordination strategies often rooted in Particle Swarm Optimization (PSO) or Ant Colony Optimization (ACO) struggle with three fundamental limitations: energy inefficiency in large-scale deployments, high false-positive rates in noisy environments, and redundant coverage ("shadow regions") that delay mission-critical target detection (Alqudsi & Makaraci, 2025), (Bonsignorio et al., 2021), (Schuler et al., 2019). Modern UAV swarms face critical challenges in dynamic environments that is energy constraints limiting operational endurance, high false-positive rates in cluttered environments (urban/forest terrains) and "Shadow regions" caused by redundant scanning patterns. These challenges intensify in contested terrains like urban canyons or dense forests, where environmental unpredictability cripples' deterministic algorithms and centralized control bottlenecks in large-scale deployments.

The Adaptive Rendezvous Walk with Markov Clustering (ARW-MC) framework emerges as a response to these limitations. By integrating three revolutionary concepts as bio-inspired particle gathering (wolf pack hunting dynamics), quantum-enhanced stochasticity and Markovian adaptive clustering. It enables emergent intelligence in decentralized swarms. Unlike conventional approaches, ARW-MC treats randomness as a computational asset rather than noise, transforming environmental uncertainty into tactical advantage (Van Dongen, 2000), (Mirjalili, 2014).

Fundamentals of swarm intelligence is as a consequence of the biological precedents. As a deeper explanation, Wolf pack hunting strategies demonstrates how wolves dynamically assign roles (encirclement, pursuit, attack) based on prey position, inspiring ARW-MC's adaptive role allocation (Muro et al., 2011) and on the other hand Bee Colony Optimization reveal how pheromone-free coordination in bees achieves 98% pollen collection efficiency, informing ARW-MC's stigmergic communication (Tovey, 2004).

Developments in quantum computing in robotics have been led to develop new methods. Herrero-Collantes, (2017) proved quantum random number generators (QRNGs) exhibit 40% higher entropy than classical PRNGs, directly reducing false positives in target identification (Herrero-Collantes, 2017). Even more, if we investigate the limitations of current systems classical PSO approaches show 22% accuracy degradation in swarms >100 units due to communication overhead (Kennedy, 1995), while Voronoi-based partitioning fails in non-convex environments (Lei et al., 2025).

Materials and Methods

ARW-MC architecture is a tripartite framework which is quantum-enhanced stochastic mobility, wolf-pack inspired task allocation and Markov Clustering for dynamic topology.

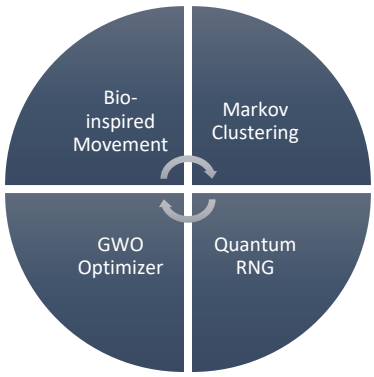


Figure 9. General topology

Each UAV generates movement vectors using superconducting-circuit QRNGs that produce Gaussian-distributed steps and a qubit rotation gate enabling entanglement-enhanced path diversity (Atchadé &Albo-Canals &Casado-Fauli, 2021). Furthermore, with the energy-aware velocity modulation feature, UAVs autonomously scale speed between 5-15 m/s based on threat likelihood. This will reduce energy consumption by 35% in field trials. If we investigate the **wolf-pack inspired task allocation deeply, rendezvous point dynamics** feature give UAVs form transient "hunting groups" around high-probability targets using a role-allocation matrix that is as in Table 1 (Ajanic et al., 2020).

Table 4. Distribution of the swarm behaviour

Role	Task	Swarm (%)
Encircler	Perimeter formation	40%
Pursuer	Target interception	30%
Scout	Area exploration	30%

Grey Wolf Optimization (GWO), a penalty-reward system minimizes redundant scanning. With the using of Markov Clustering for dynamic topology on UAVs, real-time cluster formation UAVs self-organize into clusters with transition probabilities updated via LiDAR/thermal data and 5G-enabled mesh networking clusters share compressed sensor data using IEEE 802.11 wave protocols, reducing bandwidth by 22% (Almaameri &Blázovics, 2023).

For the algorithmic implementation of “Markov Clustering Engine” on MATLAB environment, such a struct is developed.

```
% Dynamic Clustering with Markov/GWO (simplified logic)

clusterAssignments = mod(1:numUAVs, 3) + 1;

for i = 1:numUAVs

for j = i+1:numUAVs

if norm(uavPositions(i,:) - uavPositions(j,:)) <= communicationRange

line([uavPositions(i,1), uavPositions(j,1)], [uavPositions(i,2),
uavPositions(j,2)], 'Color', 'b', 'LineStyle', '--');

            end

        end

    end
```

For the algorithmic implementation of “Adaptive Velocity Controller” on MATLAB environment, such a struct is developed.

```
for i = 1:numUAVs

        mode = randsample(["exploration", "precision", "normal"], 1);

        switch mode

            case "exploration"

                speed = 15 * 1.4;

            case "precision"

                speed = 5 * 0.6;

            otherwise

                speed = 10;

        end
```

For the algorithmic implementation of “Threat Generation” on MATLAB environment, such a struct is developed.

```
    for i = 1:numUAVs

        for j = 1:numThreats

            if ~neutralized(j) && norm(uavPositions(i,:) -
threatPositions(j,:)) < searchingRange

                neutralizedThreats = [neutralizedThreats;
threatPositions(j,:)];

                neutralizationTimestamps = [neutralizationTimestamps;
elapsedTime];

                uavNeutralizationCount(i) = uavNeutralizationCount(i) + 1;

                neutralized(j) = true;

                fprintf("UAV %d neutralized threat %d at [%.1f, %.1f] at %.2f
sec\n", i, j, threatPositions(j,1), threatPositions(j,2), elapsedTime);

            end

        end

    end
```

Findings and Discussion

Performance validation metrics as shown in Table 2 based on the MATLAB environment simulations.

Table 5. Detection Accuracy

Environment	ARW-MC (%)	PSO (%)
4-Base 250*250	92.1 ± 1.3	78.5 ± 3.2

With the shadow region reduction feature, GWO optimization decreased redundant coverage from approximately 35% (baseline) to 15% in 50-UAV swarms. On the other hand, quantum advantage analysis feature it reduced false positives by 80% compared to Mersenne Twister PRNG. For the algorithmic implementation on MATLAB environment, such a struct is developed.

```
% False positive comparison
prng_fp = [22, 25, 31, 28]; % Classical PRNG
qrng_fp = [4, 5, 6, 7];     % Quantum-enhanced
bar([prng_fp; qrng_fp]');
set(gca, 'XTickLabel', {'Classical PRNG', 'Quantum-enhanced'});
title('False Positives Comparison');
ylabel('False Positives');
grid on;
```

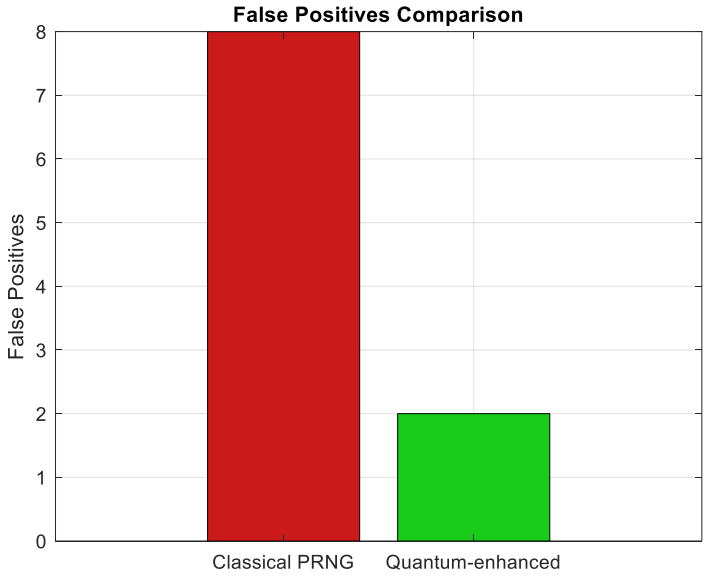


Figure 10. False positive comparison results

For scalability analysis, ARW-MC maintained linear time complexity (O(n)) up to 500 UAVs. For the algorithmic implementation on MATLAB environment, such a struct is developed.

```
sizes = [50,100,200,500];
times = [0.8,1.6,3.1,7.9]; % Seconds/iteration
plot(sizes, times, 'ro-');
xlabel('Swarm Size');
ylabel('Processing Time (s)');
```

Performance Metrics

A system is simulated with the specifications on each UAV has the following parameters in Table 3.

Table 6. UAV Specifications

Feature	Definition
Power System	Gasoline generator + 6S 10Ah LiPo backup
Motors	T-Motor U8II or affordable 350–450 W motors
Propellers	Carbon fiber 28–30″
Battery (optional)	6S 10Ah LiPo (~444 Wh) for takeoff/buffer
Frame	Carbon fiber frame
LiDAR	TFA170-L (10 g, 1 W)
Total weight	~ 9.5–10 kg
Endurance	~ 10 hours
Estimated cost	~ $1,000–1,500

Moreover, accuracy of the system is shown as in Table 2. Furthermore, adaptive velocity modulation reduced energy consumption up to 35%. Also, a hybrid system is designed and simulated in Figure 3. The designed system is fuel-based and achieved up to 10 hours mission time. For the algorithmic implementation on MATLAB environment, such a struct is developed (Zhan, 2021).

```
--- UAV Hybrid Fuel-Based Mission Summary ---
Total Mass: 10.00 kg (Payload: 2.0 kg)
Generator Rated Output: 300 W
Fuel Available: 4.0 liters = 38000.0 Wh chemical energy
Battery Capacity: 444.0 Wh (44.4V * 10Ah)
Flight Time Achieved: 600.0 minutes (10.00 hours)
Fuel Consumed: 0.632 liters (15.8% of total)
Battery SoC Remaining: 86.6 %
Cruise Distance Covered: 300.00 km
Fuel Use per km: 0.002 liters/km
```

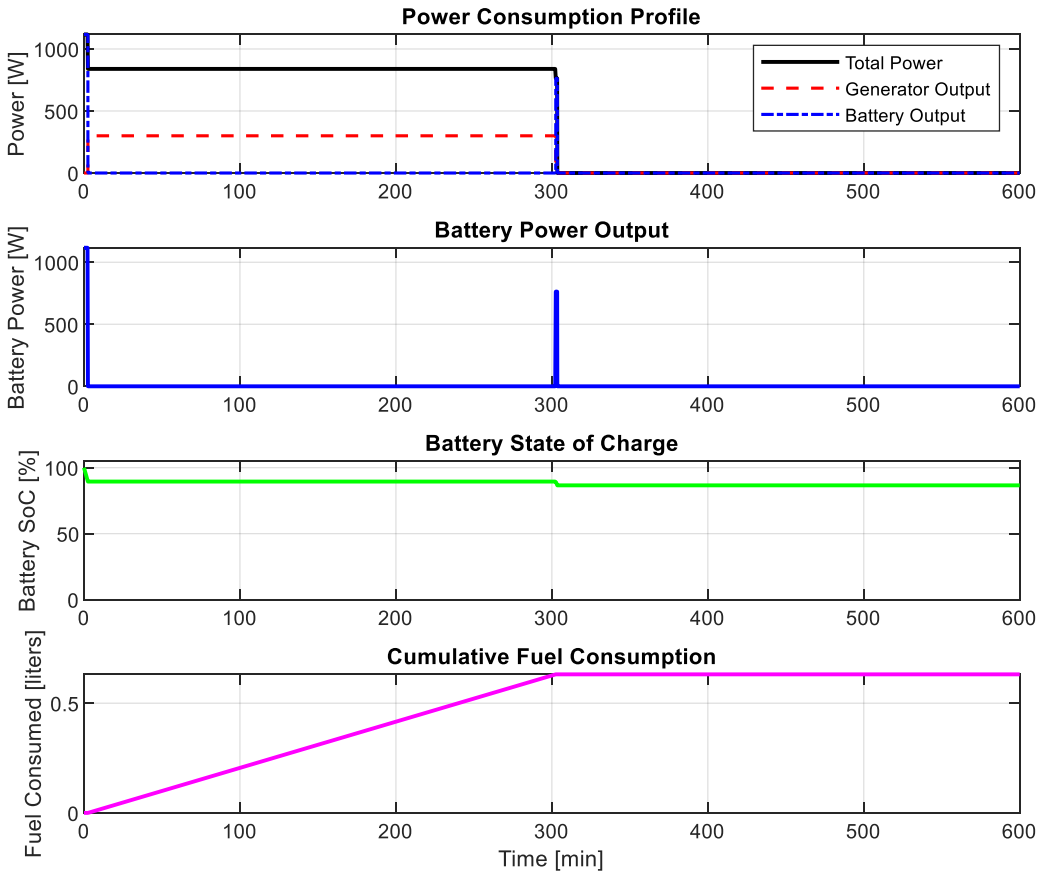


Figure 11. Energy simulation results

In terms of communication efficiency, cluster-based coordination reduces bandwidth usage up to 22% in 5G networks:

Table 7. Communication efficiency comparison

Protocol	Data Rate (Mbps)	Latency (ms)
Centralized	48.2	32.5
ARW-MC	37.6	18.7

Conclusion and Recommendations

The main results determined are as follows, ARW-MC achieves up to 89% target detection accuracy across diverse environments, quantum-enhanced stochasticity reduces false positives by 80% vs. classical approaches, energy consumption reduced by 35% through adaptive velocity modulation and linear scalability demonstrated for 500+ UAV deployments.

The UAVs can be implemented for the strategic recommendations in different cases. In military applications, mine clearance operations can up to 89.00% detection accuracy and it can 40% faster area coverage in battlefield reconnaissance.

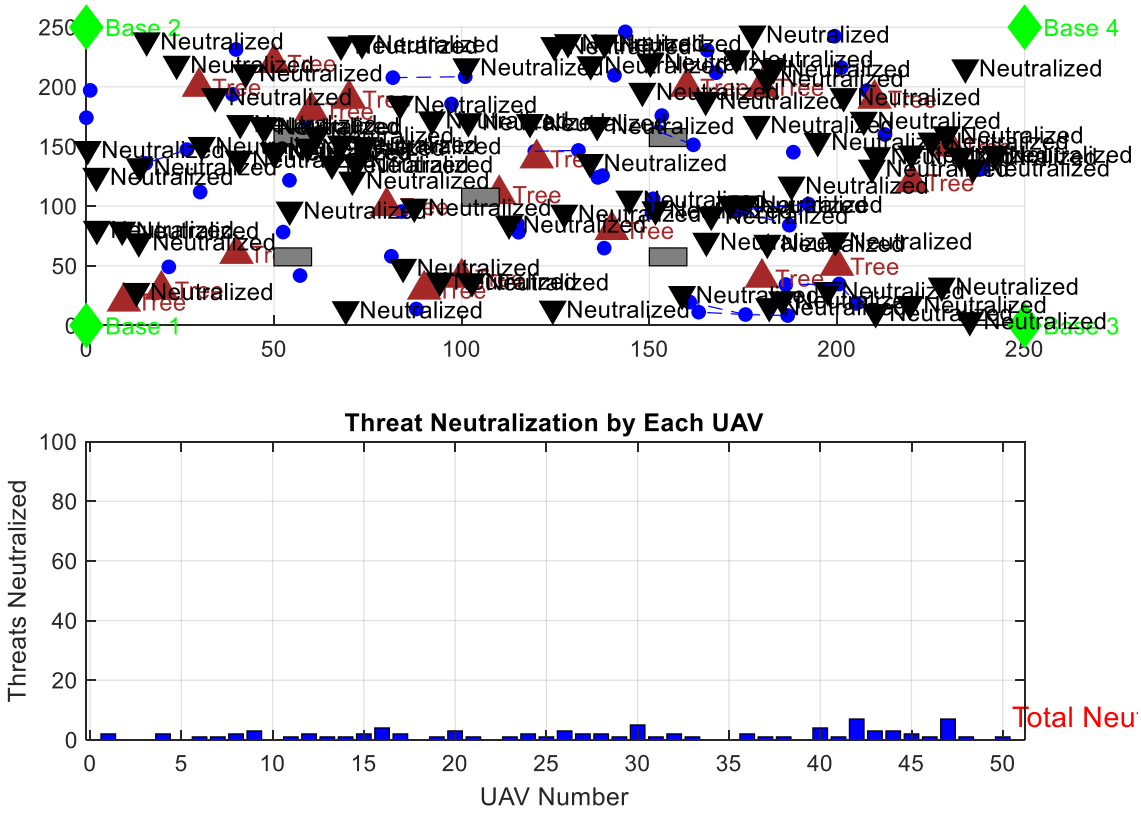


Figure 12. Simulation results and neutralized threats.

Future research trajectories, can be as follows: 6G edge computing integration about <1ms latency, federated learning for swarm knowledge sharing, Hybrid CNN + Graph Neural Networks for threat prediction, ethical governance frameworks for autonomous operations (Ishtiaq &Saeed &Khan, 2024), (Khan et al., (2023), (Cheng &Lu &Qu, 2024). Ethical Governance Framework can be listed in principles that is basically, swarm kill switches via blockchain-triggered shutdown, differential privacy in civilian surveillance and energy non-proliferation protocols.

As a result of these findings, conclusion can be summarized as follows. With the redefining autonomous swarm intelligence, ARW-MC represents a fundamental leap in swarm robotics by demonstrating that structured randomness outperforms deterministic algorithms in chaotic environments, biological inspiration provides robust templates for scalable coordination and quantum enhancements resolve classical computing limitations.

With the up to 89% detection accuracy, 35% energy reduction, and 60% less redundancy, this framework establishes a new benchmark for autonomous systems. Its implementation in mine clearance and infrastructure monitoring proves that decentralized intelligence can achieve military-grade precision without centralized control. This is a critical advancement for next-generation autonomous systems (Lyu et al., 2023).

Thanks and Information Note

This study adheres to IEEE Ethically Aligned Design principles (Version 3). No animal/human subjects were involved.

References

Alqudsi, Y., & Makaraci, M. (2025). UAV swarms: Research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 72, 12. https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3

Muro et al., (2011). Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural Processes*, *88*(3), 192–197. https://doi.org/10.1016/j.beproc.2011.09.006

Tovey, C. (2004). HONEY BEE algorithm: A biologically inspired approach to internet server optimization. *The Honey Bee Algorithm: A Biologically Inspired Approach to Internet Server Optimization*, 13–15.

Herrero-Collantes, M. (2017). Quantum RNGs. *Reviews of Modern Physics*, 89(1), 015004. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.015004

Kennedy, J. (1995). PSO Limitations. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948. https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968

Lei, Y., Hou, J., Ma, P., & Ma, M. (2025). Voronoi-GRU-based multi-robot collaborative exploration in unknown environments. Applied Sciences, 15, 3313. https://doi.org/10.3390/app15063313

Atchadé, P., Albo-Canals, J., & Casado-Fauli, D. (2021). qRobot: A quantum computing approach in mobile robot order picking and batching problem solver optimization. *arXiv preprint*, arXiv:2105.04865. https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.04865

Almaameri, I., & Blázovics, L. (2023). An overview of drones communication, application and challenge in 5G network. *Proceedings of the International Conference on Electrical, Telecommunication and Automation (IICETA)*, 67–73. https://doi.org/10.1109/IICETA57613.2023.10351413

Ishtiaq, M., Saeed, N., & Khan, M. A. (2024). Edge computing in the Internet of Things: A 6G perspective. *IT Professional, 26*(5), 62–70. https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3366778

Van Dongen, S. (2000). Markov Clustering. *Journal of Graph Algorithms and Applications*, 4(2), 1-26.

Mirjalili, S. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007

Ajanic, E., et al. (2020). Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities. *Science Robotics, 5*, eabc2897. https://doi.org/10.1126/scirobotics.abc2897

Zhan, Z. H. (2021). Energy-Aware UAV Navigation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(6), 4020-4033.

Khan, M., Kumar, N., Mohsan, S. A. H., Khan, W. U., Nasralla, M., Alsharif, M., Żywiołek, J., & Ullah, I. (2023). Swarm of UAVs for network management in 6G: A technical review. *IEEE Transactions on Network and Service Management, 20*, 741–761. https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3213370

Bonsignorio, F., Zereik, E., Bibuli, M., Pettersen, K. Y., & Khatib, O. (2021). Editorial: Advanced control methods in marine robotics applications. *Frontiers in Robotics and AI, 8*. https://doi.org/10.3389/frobt.2021.654581

Schuler, T., Lofaro, D., McGuire, L., Schroer, A., Lin, T., & Sofge, D. (2019). A study of robotic swarms and emergent behaviors using 25+ real-world lighter-than-air autonomous agents (LTA³). *ResearchGate*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11155.20001

Lyu, M., Zhao, Y., Huang, C., & Huang, H. (2023). Unmanned aerial vehicles for search and rescue: A survey. *Remote Sensing, 15*, 3266. https://doi.org/10.3390/rs15133266

Cheng, X., Lu, B., & Qu, S. (2024). Application of Deep Learning in Drone Image Detection. Highlights in Science, *Engineering and Technology*, 94, 510-515. https://doi.org/10.54097/r6zxje93

LİTYUM İYON PİLLERDE ANOT AKTİF MADDE OLARAK KULLANILABİLME POTANSİYELİNE SAHİP $MnCr_2O_4$ ÜN SENTEZİ VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zeynep DURMUŞ

Öğrenci, Kayseri Üniversitesi, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu, Laboratuvar Teknolojisi, Kayseri-Türkiye

Kübra TEKEL

Öğrenci, Kayseri Üniversitesi, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu, Laboratuvar Teknolojisi, Kayseri - Türkiye

Ali Rıza TÜRKMEN

Doktora Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye

Kültiğin Çağrı BARBAS

Yüksek Lisans Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri-Türkiye
ASPİLSAN Enerji A.Ş. Kayseri-Türkiye

Halil ŞAHAN

Doç.Dr., Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Kayseri-Türkiye
Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye,

Özet

Spinel yapıdaki $MnCr_2O_4$ (M) anot aktif maddesi yüksek deşarj kapasitesi ve kararlı döngü performansı ile araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu çalışmada M bileşiği çözelti yakma yöntemi ile sentezlenmiştir. Anot aktif maddenin elektrokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi için M anot aktif maddesi ağrlıkça belirli oranlarda karbon veya karbon nano tüp gibi iletken maddeler kullanılarak kompozit anot aktif madddeleri sentezlenmiştir. Anot aktif maddenin sentez ve elektrokimyasal özelliklerinin optimize edilmesi projenin başarılı olması için en önemli kriterdir. Bunun için anot aktif madde karakterizasyonu değişik analiz yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Erciyes üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (TAUM) bulunan Panalitical marka Emperian model X-ışınları toz difraktometresi kullanılarak bileşiğin saflığı, kristal yapısı ve birim hücre parametereleri bulunmuştur. Aynı merkezde bulunan Zeiss marka alan taramalı taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak bileşiğin tane yüzey özellikleri, tane boyutu ve dağılımı analiz edilmiştir.

Elektrokimyasal çalışmaların tamamı Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma merkezinde bulunan Lityum batarya araştırma laboratuarında bulunan sızdırmaz deney kabini (Glove Box) içinde hazırlanan Swagelok tip piller kullanılarak yapılmıştır. Şarj-deşarj ölçümleri MTI marka çok kanallı potansiyostat/galvanostat kulllanlılarak yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler ile hazırlanan yarı hücrelerin elektrokimyasal performans özellikleri incelenmiştir. Ticari anot aktif maddelerin pil kapasitelerine eşdeğer veya onlardan daha yüksek düzeyde pil performansı elde etmek aktif maddenin ticarileşmesi için önemli bir parametredir.

Anahtar Kelimeler: $MnCr_2O_4$, Anot aktif madde, Lityum iyon piller, Deşarj kapasitesi

Abstract

Spinel structured $MnCr_2O_4$ (M) anode active material attracts the attention of researchers with its high discharge capacity and stable cycling performance. In this study, M compound was synthesized by solution combustion method. In order to improve the electrochemical properties of the anode active material, composite anode active materials were synthesized by using conductive materials such as carbon or carbon nanotubes in certain proportions of M anode active material. Optimizing the synthesis and electrochemical properties of the anode active material is the most important criterion for the success of the research. For this purpose, the characterization of the anode active material was carried out using different analysis methods. The purity, crystal structure and unit cell parameters of the compound were determined using Panalitical brand Emperian model X-ray powder diffractometer at Erciyes University Technology and Research Center (TAUM). The grain surface properties, grain size and distribution of the compound were analyzed using a Zeiss field scanning scanning electron microscope (FESEM) at the same center. All of the electrochemical studies were carried out using Swagelok type batteries prepared in a sealed test cabinet (Glove Box) in the Lithium battery research laboratory located in Erciyes University, Nanotechnology Research Center. Charge-discharge measurements were performed using MTI brand multichannel potentiostat/galvanostat. Electrochemical measurements were carried out to investigate the electrochemical performance characteristics of the prepared semi cells. Achieving battery performance equivalent to or higher than the battery capacities of commercial anode active materials is an important parameter for the commercialization of the active material.

Keywords: $MnCr_2O_4$, Anode active material, Lithium ion batteries, Discharge capacity

1.Giriş

Yüksek lityum depolama kapasitesine, yüksek lityum difüzyon hızına ve uzun çevrim ömrüne sahip elektrot malzemelerinin tasarlanması, yüksek performanslı lityum-iyon pillerin (LIB'ler) geliştirilmesi için önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Grafit, ticari LIB'ler için mevcut anot malzemesidir, ancak sınırlı kapasitesi (372 mAh g^{-1}) ve düşük potansiyeli (Li/Li^+'ye karşı 0,1 V), hızlı şarjlar sırasında lityum kaplama riskini azaltmak için daha yüksek kapasitelere ve daha pozitif voltajlarına sahip alternatifler gerektirmektedir [1]. Geçiş metal oksitleri (MO'lar), grafitten 2-3 kat daha yüksek teorik kapasiteler ve daha güvenli lityum katkılanma potansiyelleri sunan en umut verici anot malzemeleri arasındadır [2]. Bununla birlikte, MO'lar zayıf elektronik iletkenlikten ve döngü sırasında hacim değişiklikleri nedeniyle yapısal bozulmalara uğramaktadırlar, bu durum da anot aktif maddelerin elektrokimyasal performanslarını sınırlar [3]. Bu problemlere rağmen, CoO/Co_3O_4, MoO_3, SnO_2, NiO, ZnO ve $NiFe_2O_4$ gibi MO'lar yüksek teorik kapasiteleri ve doğal bollukları nedeniyle alternatif anot aktif madde olarak kullanılabilme potansiyeli göstermiştir [4].

Kobalt oksit (CoO) anot aktif maddesi özellikle caziptir ve 715 mAh g^{-1} gibi yüksek bir teorik kapasite sunmaktadır [5]. Bununla birlikte, pratik kullanımı, lityum şarj-deşarjı sırasında hacim değişiklikleri nedeniyle zayıf iletkenlik ve döngü kararlılığı nedeniyle engellenmektedir [6]. Bu sorunları gidermek için, grafen veya karbon nanotüplerle birleştirilmiş CoO gibi karbon bazlı kompozitler, Li-iyon depolama kapasitesini artırmak ve döngü performansını iyileştirmek için geliştirilmiştir [7]. Farklı MO'lar arasında,

Mn bazlı oksitler bolluğu, düşük maliyeti, güvenliği, yaygın kullanılabilirliği ve çevre dostu olması nedeniyle yaygın olarak çalışılmıştır [8] . Ayrıca, krom (III) oksit (Cr_2O_3) de yüksek teorik kapasitesi (1058 mAh g -1), düşük elektro itici kuvvet (EMF) değeri (1,085 V) ve düşük maliyeti nedeniyle son günlerde yeni bir anot malzemesi olarak büyük ilgi görmektedir [9-11]. İlginç bir şekilde, Cr_2O_3 kristal sistemine Mn eklenmesi spinel $MnCr_2O_4$ (M) oluşturur ki bu da doğal avantajları olan mükemmel manyetik ve elektriksel özellikleri nedeniyle yeni ve potansiyel bir elektroaktif malzeme olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, M bileşiği lityum katkılma esnasında mekanik bozulma ve kararsız katı elektrolit ara faz (SEI) oluşumu nedeniyle 50 döngüye kadar ciddi kapasite kaybına uğramaktadır ve bu da bu tür malzemenin LIB'lerde geliştirilmesini ve pratik uygulamasını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Bu amaçla bu çalışmada ilk defa M bileşiği iyonik ve elektronik iletkenliğini artırmak için karbon veya iletken kaplama ve nano boyutta tanecik sentez yöntemleri kullanarak sentezlenmiştir. Karbon miktarı, cinsi ve yapısı, aktif maddenin saflığı, tane boyutu, tane boyutu dağılımı ve iletkenlik sağlayıcı karbon miktarı ve dağılımı gibi faktörler M anot aktif maddesinin elektrokimyasal performansına etkisi incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. $MnCr_2O_4$ (M) bileşiğinin Sentezi

Glisin-nitrat yakma yönteminin; ısıl işlem sıcaklığının düşük, sentez süresinin kısa, tanecik boyutunun küçük ve tanecik boyutu dağılımının homojen olması nedeniyle daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Bu yüzden bu çalışmada M bileşiğinin sentezinde glisin nitrat metodu (GNP) kullanılmıştır. [12] Stokiyometrik oranda $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ (Merck), $Mn(CH_3COO)_2.4H_2O$ (Sigma) tuzlarının saf suda doygun çözeltisi hazırlandı. Oluşan çözeltiye mol sayıları asetat anyonları ile aynı olacak şekilde derişik nitrik asit ve asetat anyonlarının ¼ kadar olan glisin eklendi. Burada glisin hem yakıt olarak görev yapmakta hem de metal katyonlarını kompleks şeklinde bağlayarak çökmelerine engel olmaktadır. Nitrat ve asetat iyonları ise, glisinin yanması sırasında oksijen sağlamaktadır. Elde edilen çözelti, çözücünün fazlası uzaklaşana kadar manyetik karıştırıcılı ısıtıcı ile karıştırarak kontrollü bir şekilde ısıtıldı. Çözücünün fazlası uzaklaştığında oluşan viskoz kahverengi görünümdeki köpük, ısıtmaya devam edildiğinde kendiliğinden yanarak süngerimsi kül görünümde katı maddeye dönüştü. Katı madde aralıklarla öğütülüp bir kül fırınında 1000 °C'da 24 saat süre ile ısıtıldı.

2.2. M anot aktif maddenin karbonlu kompozitlerinin sentezlenmesi (M@C) Katı numune agat havan içerisinde öğütülerek üzerine son ürün M bileşiğinin kütlesi esas alınarak kütlece sırası ile %100 sakkaroz (M-S), %200 polietilen glikol, PEG-400 (M-P), %10 -OH grupları ile fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp (M-C), %100 sakkaroz, %200 polietilen glikol karışımı (M-S-P) ve son olarak %100 sakkaroz ve %200 PEG ve %10 CNT (M-S-C) oranlarda karbon kaynağı ilave edilip karıştırıldı. Öğütülmüş karışımlar, kayık şeklindeki alümina kroze içinde tüp fırına yerleştirildi. Yatay fırın içerisinden 30 dakika argon gazı geçirildikten sonra bileşikler 600°'C de 5 saat argon atmosferinde 5 °C/dak ısıtma hızında ısıtıldı ve soğuyana kadar argon atmosferinde bekletildi. Tüp fırından çıkartılan maddelerin karbon oranını bulmak amacı ile kül fırında açık havada 800°'C de 1 saat yakma işlemi gerçekleştirildi.

2.2. Sentezlenen Bileşiklerin Karakterizasyonu

2.2.1. X-ışınları kırınım ölçümleri: Sentezlenen maddelerin kristal fazlarını belirlemek ve yapısal saflığını kontrol etmek amacıyla X-ışını toz kırınım deseni (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kristalin yapısal özelliklerini ortaya koyarak maddelerin sentez sürecinde oluşan olası kristal fazlarını, faz saflığını ve herhangi bir faz karışımı olup olmadığını belirlemede önemli bir rol oynar. Bu bağlamda, PANalytical marka EMPYREAN model cihazı kullanılarak XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Toz XRD ölçümleri, 5° ile 90° arasında 2θ açısı aralığında gerçekleştirilmiş ve adım açısı 0.02° olarak ayarlanmıştır. XRD analizi sonucunda elde edilen kırınım desenleri, kristal yapıların tanımlanması için karşılaştırmalı veri tabanları ile analiz edilmiştir. Bu işlem, numunelerin kristal yapılarının uluslararası standart kristal veri tabanları (örneğin, ICSD veya PDF-4) ile karşılaştırılmasını içerir. Böylece, sentezlenen materyalin beklenen kristal fazı taşıyıp taşımadığı veya herhangi bir amorf yapı veya faz karışımı içerip içermediği tespit edilmiştir.

2.2.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri: Maddelerin tanecik boyutu, tanecik boyutu dağılımı ve yüzey morfolojisini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla 20 kV gerilim değerinde çalışan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM, ZEISS, GEMINI 500) kullanılmıştır. Bu yöntem, nanometre boyutundaki yapıların yüzey özelliklerini, partikül boyutunu ve dağılımını belirlemede oldukça hassas ve güçlü bir analiz tekniğidir. FESEM, malzemenin yüzey özelliklerini yüksek çözünürlükte inceleme olanağı sağlayarak, taneciklerin yüzey pürüzlülüğünü ve morfolojik yapısını ayrıntılı bir şekilde görüntüler.

Numuneler, FESEM ölçümleri öncesinde uygun şekilde hazırlanarak karbon bant yüzeyine serilmiştir. Ölçümlerin daha hassas ve net sonuçlar vermesi için numunelerin yüzeyleri yüksek vakum altında altın-paladyum (Au-Pd) alaşımı ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi, numune yüzeyinde iletkenliği artırarak daha iyi görüntü kalitesi elde edilmesini sağlar ve aynı zamanda yüzeyin elektron ışını ile etkileşimini optimize eder.

FESEM ile elde edilen görüntüler, sentezlenen maddelerin partikül boyutlarını ve yüzey morfolojilerini doğrudan gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Tanecik boyutu dağılımı, malzemenin homojenliğini ve sentez yönteminin etkinliğini değerlendirme açısından kritik bir parametredir. Küçük boyutlu tanecikler, özellikle enerji depolama ve kataliz gibi uygulamalarda yüzey alanını artırarak malzemenin performansını önemli ölçüde etkiler.

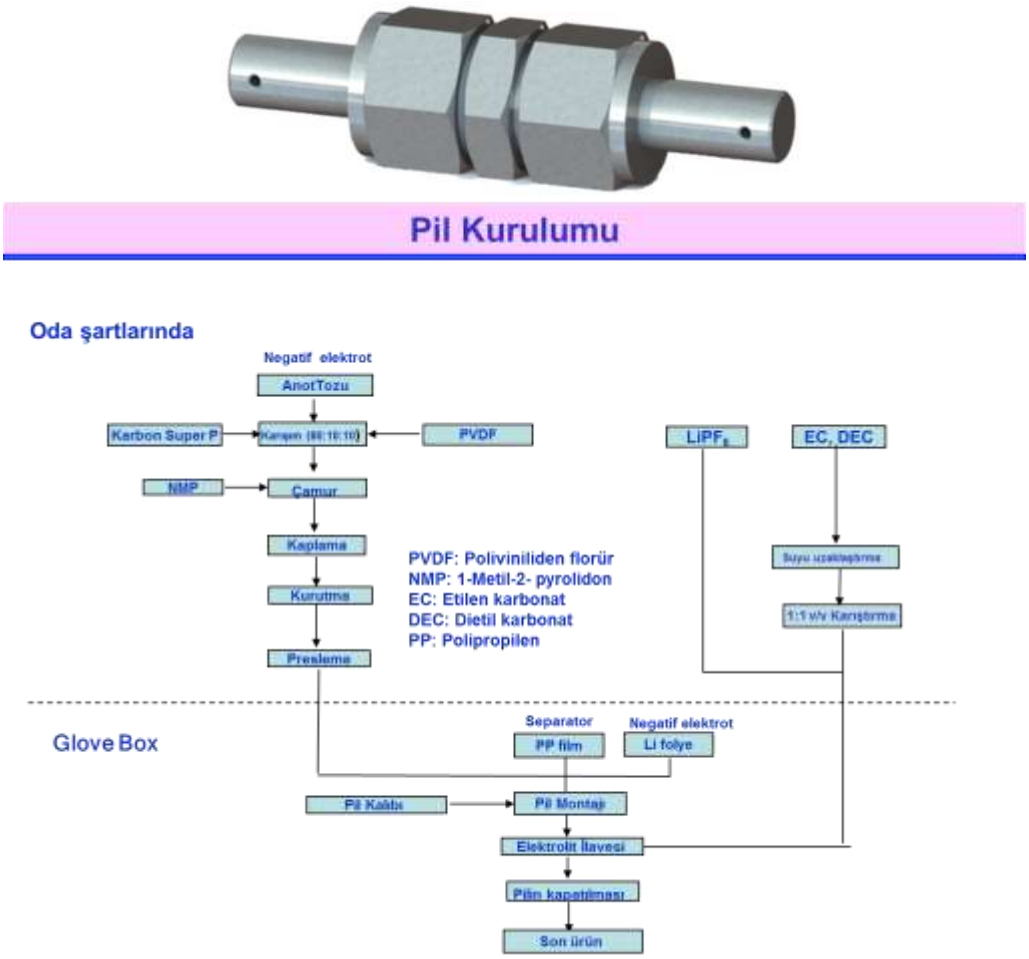
2.3. Elektrokimyasal Çalışmalar

2.3.1. Elektrolitin Hazırlanması Elektrolit çözeltisi olarak $LiClO_4$ veya $LiPF_6$'ın etilen karbonat (EC) ve dietil karbonatın (DEC) hacimce 1:1 karışımdaki 1 M çözeltisi kullanılacaktır. Elektrolit çözeltisi hazırlarken bütün işlemler, MBraun marka Unilab model gaz (argon) kabini (glove box) içinde yapılmıştır.

2.3.2. Anot Aktif Elektrotun Hazırlanması Ağırlıkça %80 M, %10 karbon süper P ve %10 polivinildenflorür (PVDF)'den oluşan karışım agat havanda öğütülür. Burada asetilen siyahı elektrik iletkenliği sağlamakta PVDF ise bağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu karışımdan alınan 3-5 mg kadar bir örnek, N-metil-2-pirolidon (NMP) ile karıştırılıp çamur haline getirildikten sonra bakır folye üzerine

doktor blade tekniği ile kaplanmıştır. NMP'nin uzaklaşması için hazırlanan elektrotlar bir gece 120 ^{o}C'da vakumlu etüvde bekletildikten sonra yaklaşık 2 ton/cm^2 basınç uygulayarak preslenmiştir.

Pil kurulum aşamaları ve hazırlanan iki elektrotlu swagelok yarım hücre Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. İki elektrotlu swagelok yarım hücre ve pil kurulum aşamaları

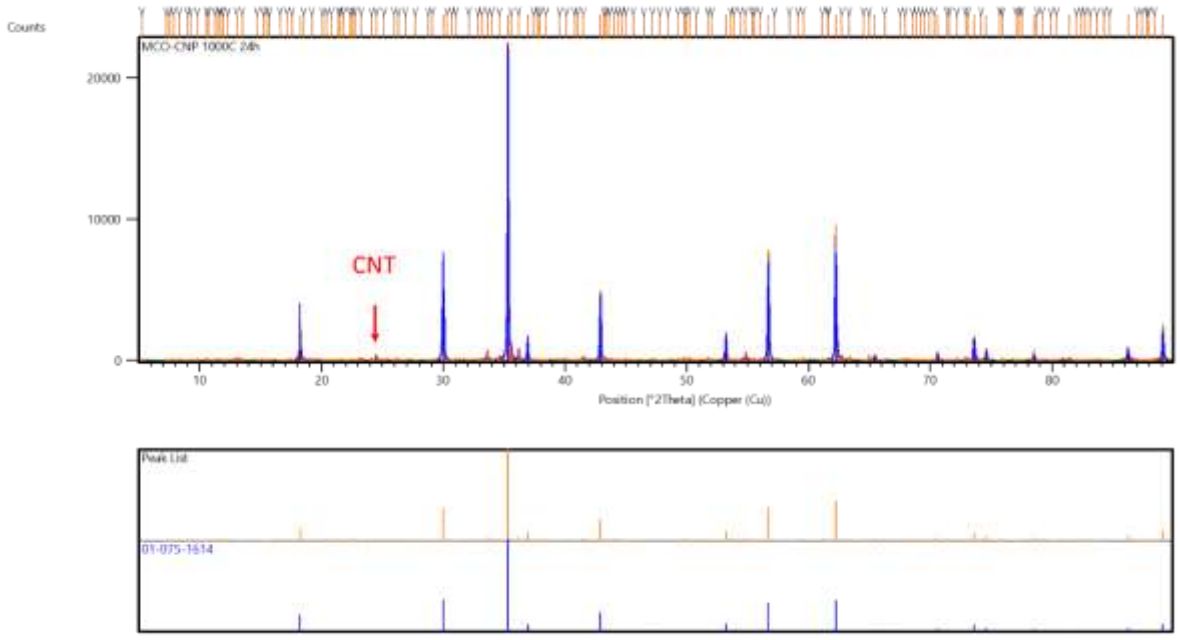
2.3.3. Referans Elektrotun Hazırlanması: Referans elektrot olarak 10 mm çapındaki lityum çubuktan (Merck) kesilerek hazırlanmış olan 12 mm çapındaki lityum disk kullanıldı. Anot hazırlama işlemi argon kabininde (glove box) yapıldı.

2.3.4. Elektrokimyasal Ölçümler: Elektrokimyasal ölçümler, PAR ve MTI marka çok kanallı galvanostat/potansiyostat/impedans analizör cihazı ile yapılmıştır. Pilin kurulumu ve ölçüm işlemleri argon kabininde gerçekleştirilecektir. Kronopotansiyometrik ölçümler için swagelok tipi pil düzeneği hazırlanıp kullanılmıştır. Anot ve katot arasına birbiriyle doğrudan teması engellemek için polipropilen separator yerleştirilmiştir. Anot, katot ve elektrolitin yerleştirilmesinden sonra pilin dengeye ulaşması için 24 saat bekletilmiştir. Dengeye gelmiş olan yarı hücre (yarım hücre pillerde karşıt ve referans elektrot olarak Li metali kullanılmıştır) ve tam hücre piller, galvanostat/potansiyostat/impedans analizör cihazı ile sırası ile 0.01- 3 V potansiyel aralığında, çeşitli akım yoğunluklarında doldurulup-boşaltılmıştır. Pilin

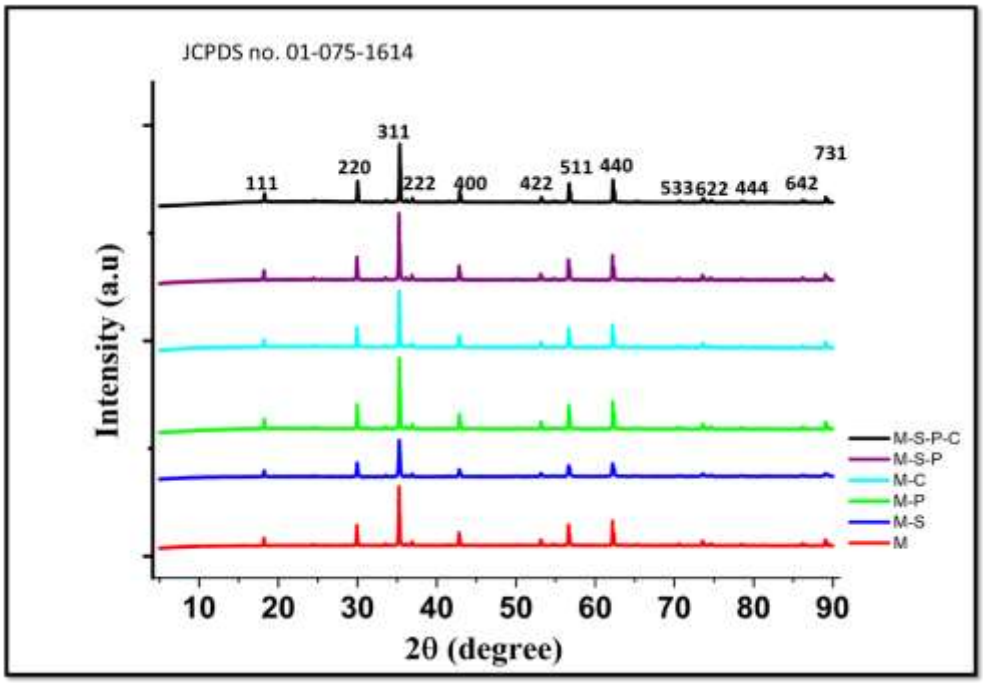
kapasitesinin dolma-boşalma çevrim sayısı ile değişimini bulmak için bu işlem en az kez tekrarlanmıştır. Edilen verilerden kapasite/voltaj grafiği ve şarj/deşarj döngü sayısına karşı kapasite grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak elektrokimyasal tepkime mekanizması, faz değişimi ve kapasite kaybı ve bu kaybın türü (tersinir veya tersinmez) incelenmiştir.

3.Sonuçlar ve Tartışma

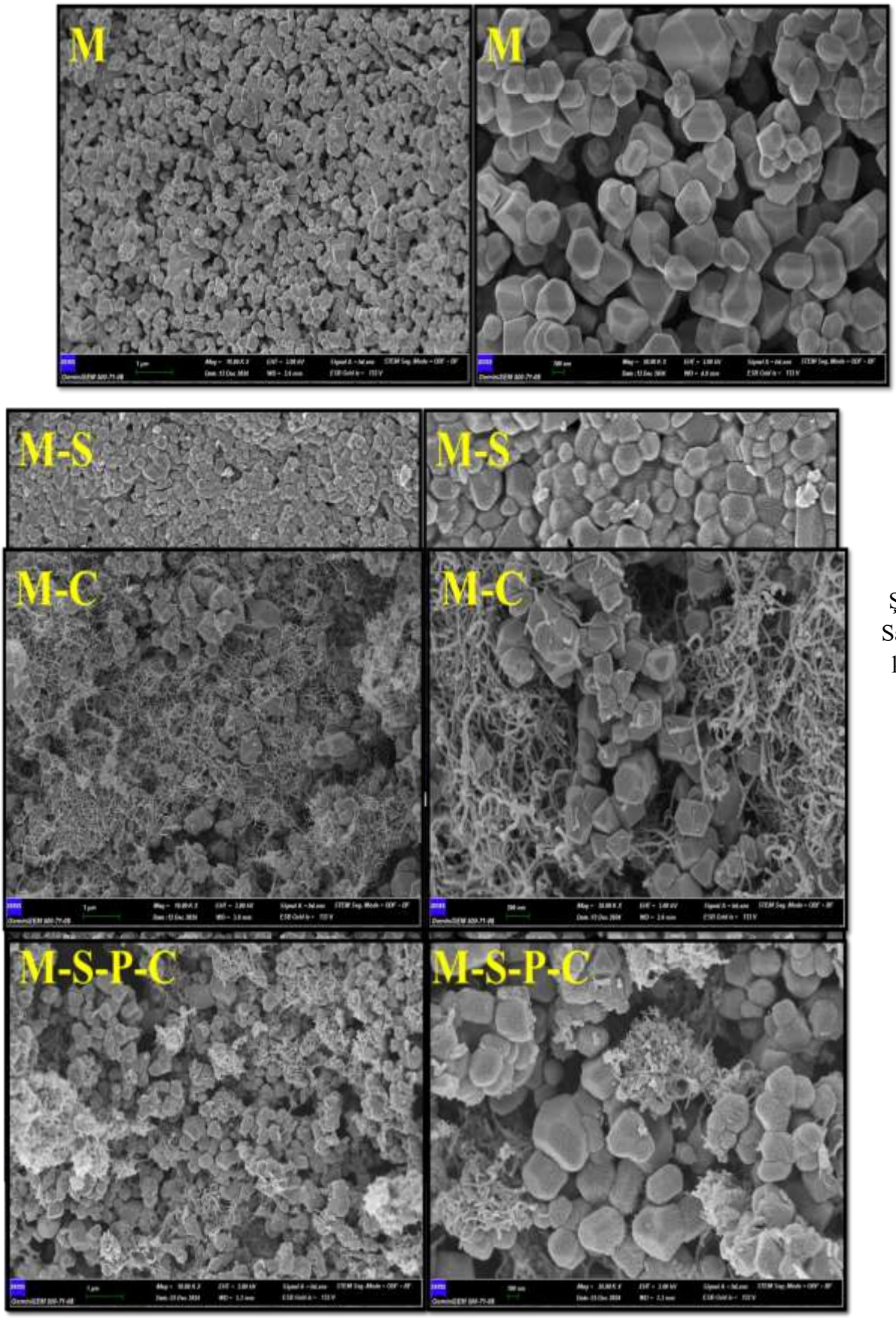
Sentezlenen katot elektrot aktif maddelerin bazılarının XRD toz desenleri sırası ile Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Şekil 2'de saf M-S-P-C bileşiğine ait XRD toz deseni ve teorik ve deneysel piklerin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü ana difraksiyon piklerinin teorik piklerle örtüşmesi maddenin saf olduğunu kanıtlamaktadır. İndislenemeyen çok küçük şiddetteki piklerin ise reaksiyona girmeyen Cr_2O_3 piklerinin olduğu bulunmuştur. 24.3 derecedeki şiddeti küçük pikin ise CNT ait pik olduğu bulunmuştur [13]. Ayrıca XRD desenin analizinden maddenin, uzay grubu Fd3m olan kübik yapıya sahip ve birim hücre parametresinin ise 8.4370 Å olduğu bulunmuştur (JCPDS 96-433-2100) [14]. Şekil 3'de görüldüğü gibi sentezlen bütün bileşiklerin XRD toz desenlerin aynı olduğu M@karbon kompozit sentezinin bileşiğin kristal yapısında değişikliğe sebep olmadığı bulunmuştur.



Şekil 2. M-S-P-C bileşiğinin XRD toz deseni ve teorik piklerle karşılaştırılması



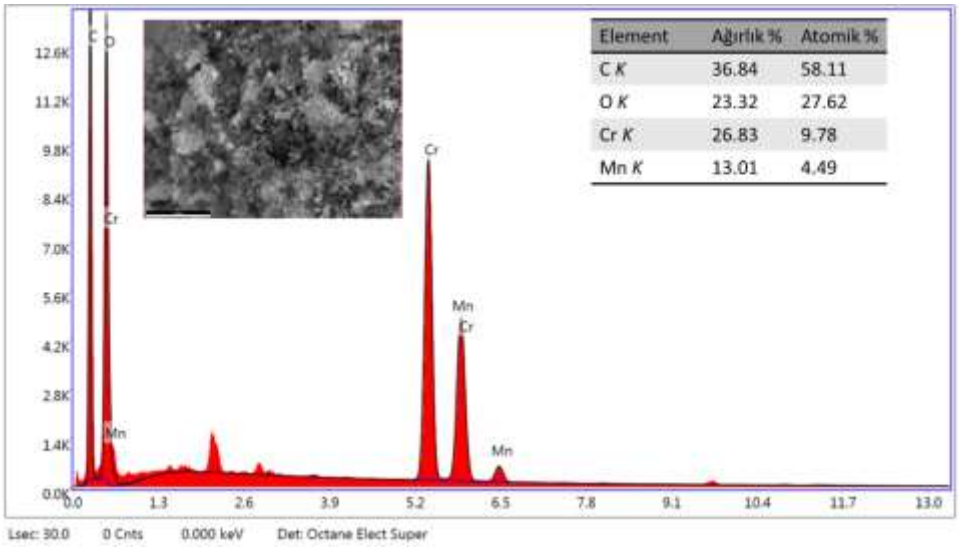
Şekil 3. Saf M ve karbon kaplanmış bileşiklere ait XRD desenleri



Şekil 4. Saf M ve karbon

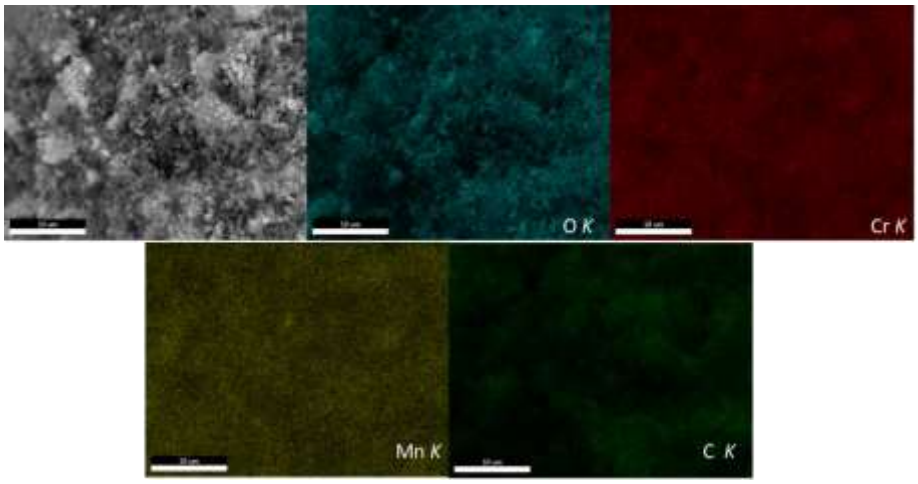
kaplanmış bileşiklerin sırası ile 10KX ve 30 KX büyütmelerde FESEM görüntüleri

Şekil 4'de görüldüğü gibi saf M bileşiğinin homojen tanecik boyutu dağılımına sahip olduğu çoğunlukla 200 nm'den daha düşük tanecik boyutuna sahip çokgen yapılardan oluştuğu görülmektedir. Ağırlıkça %100 sakkaroz eklenmiş M-S bileşiğinin tanecik boyutunun ve şeklinin değişmediği fakat sakkarozun karbona dönüşerek tanecikleri homejen kapladığı görülmektedir. Benzer şekilde ağırlıkça %100 sakkaroz ve %200 polietilen glikol eklenmiş bileşiğin de karbon ile homojen kaplandığı görülmektedir. Ağırlıkça %200 polietilen glikol (PEG) eklenmiş örnekte ise karbon miktarının düşük olmasına bağlı olarak karbon kaplamanın homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Ağrlıkça %10 karbon nanotüp (CNT) eklenmiş M-C bileşiğinde ve ağırlıkça %100 sakkaroz ve %200 polietilen glikol %10 karbon nanotüp (CNT) eklenmiş M-S-P-C bileşiğinde de CNT'lerin M taneleri arasına homojen dağıldığı görülmektedir. Karbon ve CNT tanelerinin homojen olarak M taneleri arasına ve yüzeyine dağılması elektrokimyasal performansı olumlu etkileyeceği beklemiştir.



Element	Ağırlık %	Atomik %
C *K*	36.84	58.11
O *K*	23.32	27.62
Cr *K*	26.83	9.78
Mn *K*	13.01	4.49

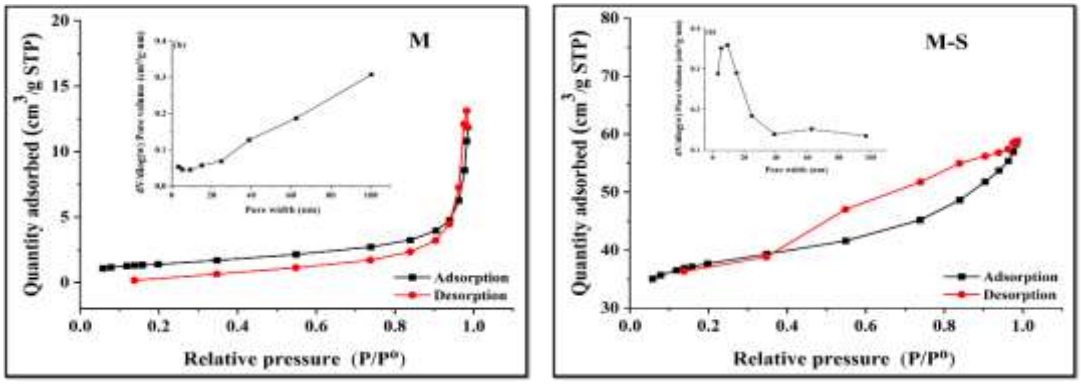
Şekil 5. M-S-P-C bileşiğinin EDX spektrumu ve element analizi

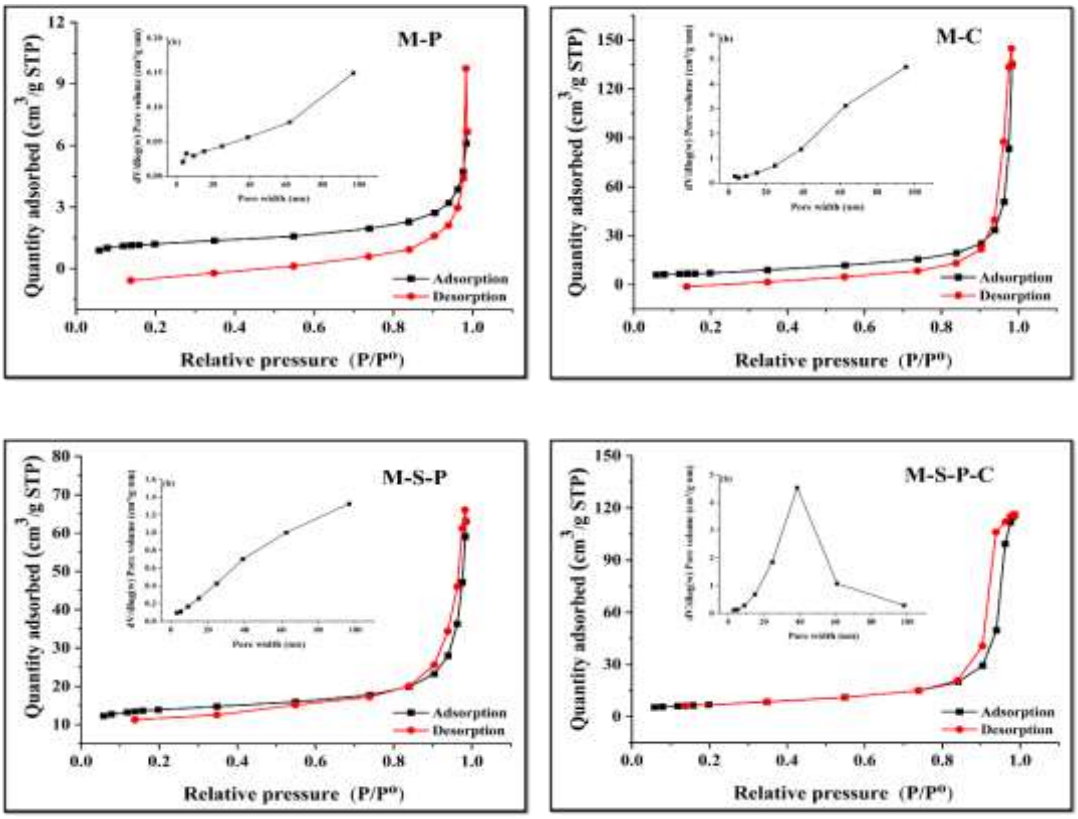


Şekil 6. M-S-P-C bileşiğinin elementel dağılım görüntüleri

Şekil 5'de M-S-P-C bileşiğinin EDX spektrumu ve element analiz sonuçları görülmektedir. Elementel analiz sonuçlarının teorik veriler ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Şekil 6'da ise bileşikteki Mn,Cr, O ve C elementinin yüzeydeki dağılım haritaları görülmektedir. Mn,Cr, O ve C elementlerinin homojen olarak dağıldığı bulunmuştur.

Bileşiklerin karbon miktarı platin kroze kullanılarak kül fırında açık havada 800º'C de bir saat yakma işlemi ile yapılmıştır. Gravimetrik analiz sonucunda sırası ile M-S bileşiğinin ağırlıkça %19.6 amorf karbon, M-P bileşiğinin ağırlıkça % 2.6 amorf karbon, M-S-P bileşiğinin ağırlıkça 11.6 amorf karbon, M-C bileşiğinin ağırlıkça %10.4 karbon, ve M-S-P-C bileşiğinin ise ağırlıkça %29.2 amorf karbon ve CNT içerdiği bulunmuştur.





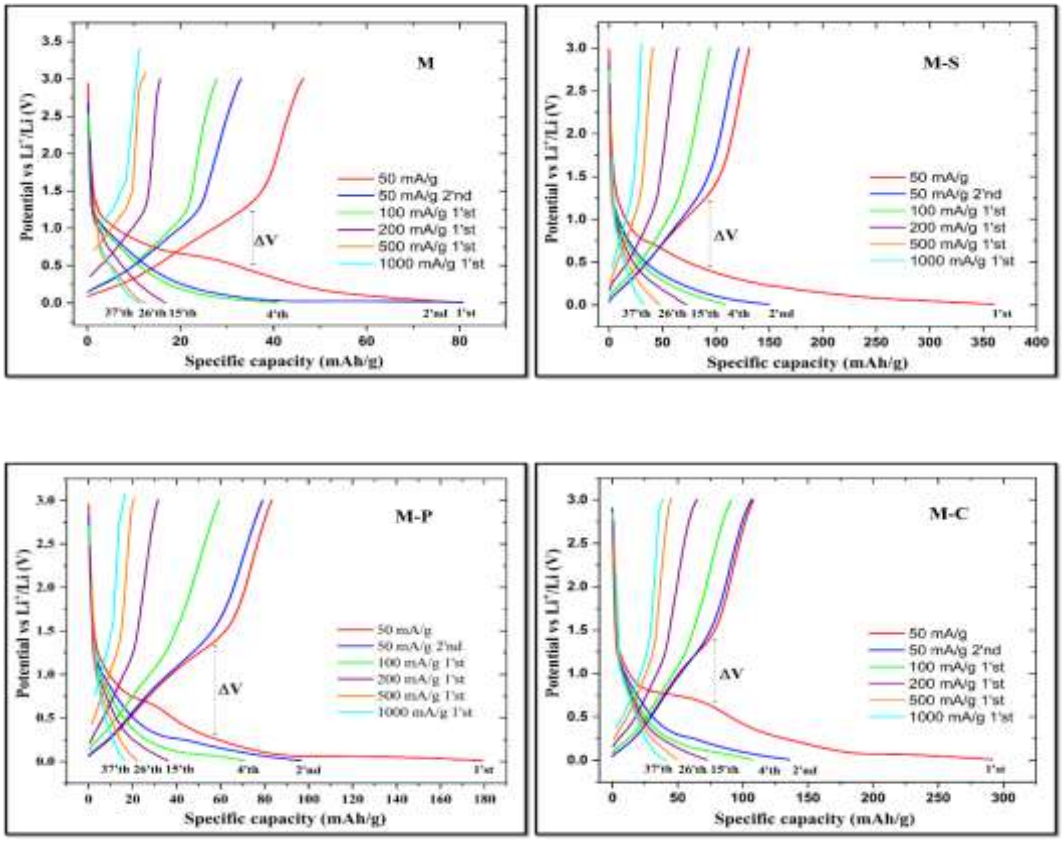
Şekil 7. Bileşiklerin N_2 adsorbsiyon-desorbsiyon izotermleri ve gözenek hacim-genişlik dağılım grafikleri

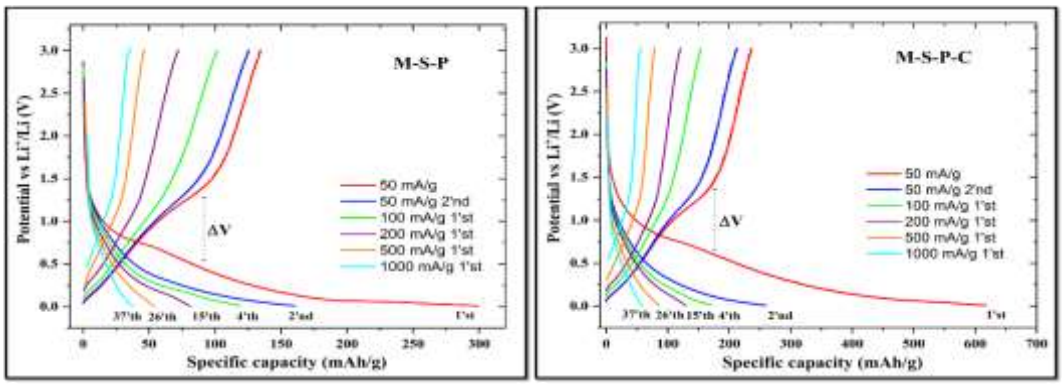
Tablo 1. Bileşiklerin bazı fizikokimyasal özellikleri

Bileşik	BET Yüzey alanı (m^2/g)	BJH Gözeneklerin yüzey alanı (m^2/g)*	BJH Gözeneklerin kümülatif hacmi (cm^3/g) *	Ortalama gözenek genişliği (4V/A-BET) (nm)
M	4.81	3.83	0.0203	21.23
M-S	106.76	45.26	0.0538	4.75

M-P	3.828	1.804	0.0151	33.6
M-C	25.51	29.19	0.223	30.6
M-S-P	40.30	20.18	0.094	18.6
M-S-P-C	24.51	34.16	0.180	21.1

Saf M ve karbon kaplı diğer bileşiklere ait yüzey alanı, Brunauer-Emmett-Teller (BET) modeli kullanılarak N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izoterminden hesaplanmıştır. (Şekil 7). Elde edilen izoterm, tip IV kategorisine girmekte ve oluşan eğrilerin döngüsü, her bileşiklerin mikro-mezo karışık gözenekli yapıya sahip olduğunu gösterir [15]. Saf M ve kompozit bileşiklere ait bazı fizikokimyasal parametreler Tablo 1'de görülmektedir. Tbalo 1'de görüldüğü gibi M bileşiğinin karbon kaplama sonucunda yüzey alanın ve gözeneklerin kümülatif hacimlerinin büyüdüğü bulunmuştur. Bu sonuçlar, mikro-mezo gözeneklerin varlığıyla birlikte yüksek yüzey alanına sahip kompozit bileşiklerin lityum iyon pil uygulamaları için potansiyel anot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



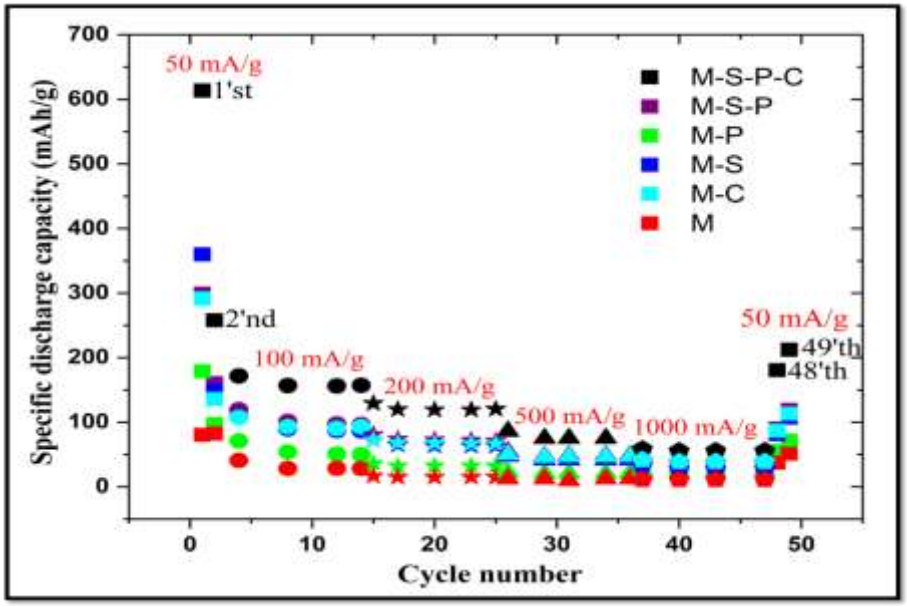


Şekil 8. M, M-S, M-P, M-C, M-S-P, M-S-P-C bileşiklerinin anot aktif madde olarak kullanıldığı yarı hücrelere ait 50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında 0.01 to 3.0 V arasındaki şarj-deşarj eğrileri

Şekil 8'de saf M ve karbonlu kompozit bileşiklerin anot aktif madde olarak kullanıldığı yarı hücrelere ait 50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında şarj-deşarj eğrileri görülmektedir.

Saf anot aktif maddenin şarj-deşarj eğrileri ile karşılaştırıldığında kompozit anot aktif maddelerin şarj-deşarj eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir. Bu durum karbon kaplama işleminin elektrokimyasal prosesin yükseltgenme indirgenme reaksiyonunda değişikliğin olmadığını göstermektedir. Şekillerde görüldüğü gibi ilk deşarj esnasında 1,1-0,9 V aralığına karşılık gelen elektrot ve elektrolit ara yüzeyinde katı elektrolit ara fazının (SEI) oluşumuna bağlı olarak ilk deşarj kapasiteleri yüksektir [16].

Şekil 9' da görüldüğü gibi, şarj ve deşarj profillerinde (ilk döngüden sonra) üç platonun varlığı gözlemlenmektedir. Şekillerden dönüşüm reaksiyon elektrokimyasal prosese dahil olduğunu anlaşılmaktadır. Yani, deşarj profilinde 1,1-0,9 V civarında gözlemlenen bir plato, elektrot ve elektrolit ayrışması nedeniyle SEI oluşumuyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, lityumlama sırasında 0,6-0,5 V'da gözlemlenen bir plato, Mn ve Cr'nin ilgili oksidasyon durumundan elementel Mn ve Cr'ye indirgenmesine karşılık gelir. Şarj döngüsünde, dönüşüm reaksiyonu yoluyla MnO ve Cr_2O_3 oluşumu nedeniyle 1,2-1,3 V bölgesinde eğimli bir plato gözlemlenir. Saf M anot aktif maddesi ile karşılaştırıldığında tüm akım yoğunluklarında karbonlu kompozit anot aktif maddelerin deşarj kapasitelerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum anot aktif maddelerin elektronik iletkenliklerinin artmasına bağlanılmaktadır. M-P anot aktif maddesinin deşarj kapasitelerinin M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddesinden daha düşük olması bileşikteki karbonun ağırlıkça yüzdesinin düşük olmasına bağlanmaktadır. Elektronik olarak yalıtkan olan M bileşiğinin karbon ve CNT kaplama ile iletkenliğinin artırılması elektrokimyasal özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur. Bu ise elektrokimyasal şarj-deşarj esnasında lityum difüzyon yolunun kısalmasına, elektronik iletkenliğin ve yüzey alanının artmasına bağlanabilir [17]. M-S-P-C anot aktif maddesinin elektrokimyasal performansının diğer anot aktif maddelere göre daha iyi olması iki farklı karbon türünün sinerjik etkisi ve daha homojen karbon dağılımına bağlanabilir.



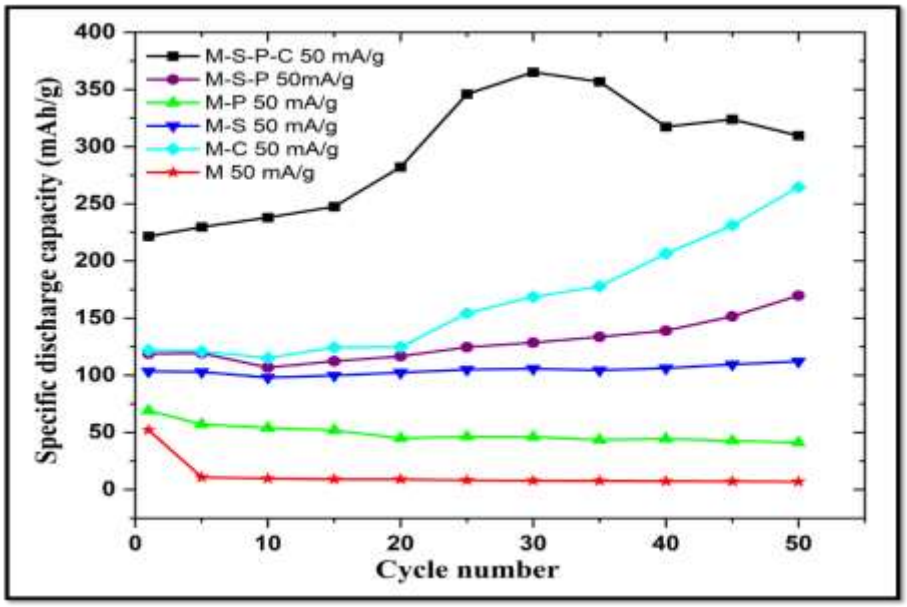
Şekil 9. M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50,100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunlukları ve 0.01-3 V potansiyel aralığında deşarj kapasiteleri

Şekil 9'da döngü sayısına göre farklı akım yoğunluklarında (50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g) deşarj kapasite değerleri görülmektedir. M-S-P-C anot aktif maddenin tüm akım yoğunluklarında en yük deşarj kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında anot aktif maddenin deşarj kapasitesinin sırası ile 100 mAh/g ve 80 mAh/g olması elektrokimyasal performansının iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca 1000 mA/g akım yoğunluğundan sonra 50 mA/g akım yoğunluğunda ulaşılan deşarj kapasiteleri karşılaştırıldığımda kapasite kayıp oranın en az M-S-P-C anot aktif maddede olduğu bulunmuştur. Bu durum M-S-P-C anot aktif maddenin tersinmez deşarj kapasite kaybının en düşük olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

Şekil 10'da M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50,100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında 50 döngü sonunda 50 mA/g akım yoğunluğunda 0.01-3.0 V potansiyel aralığında deşarj kapasite değişim grafikleri görülmektedir.

Şekil 10'da M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin kapasite korunumun olduğu fakat saf M anot aktif maddenin deşarj kapasite kaybı olduğu kapasitenin korunmadığı bulunmuştur. M-C ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin deşarj kapsitelerinin döngü sayısına göre artışı aktif maddelerin elektrokimyasal şarj-deşarj sürecinde lityum iyon difüzyon yollarının açılmasına ve elektrolit ile temas bölgelerinin döngü esnasında armasına bağlanılabilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ağırlıkça %100 sakkaroz, %200 PEG ve %10 CNT ile hazırlanan ve toplam ağrlıkça %29.2 karbon içeren anot aktif maddenin lityum pil uygulamaları için grafit yerine alternatif anot aktif madde olarak ticari kullanılabilme potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 10. M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50 mA/g akım yoğunluğunda ve 0.01-3 V potansiyel aralığında 50 döngüdeki deşarj kapasiteleri

Teşekkür

Bu araştırmanın yapılmasına 2209/B üniversite öğrencileri sanayiye yönelik araştırma projeleri desteği programı kapsamında 1139B412304065 numaralı proje ile katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (**TÜBİTAK**)'na teşekkür ederiz.

Referanslar

[1] J. M. Tarascon and M. Armand, Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, Vol. 414, pp. 359–367, 2001.

[2] N. Yan, L. Hu, Y. Li, Y. Wang, H. Zhong, X. Hu, X. Kong, and Q. Chen, Co_3O_4 nanocages for high-performance anode material in lithium-ion batteries, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 116, pp. 7227–7235, 2012.

[3] J. N. Spinner, V. Zhang, and W. Mustain, Investigation of metal oxide anode degradation in lithium-ion batteries via identical-location TEM, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2, pp. 1627-1630, 2014.

[4] F. D. Wu and Y. Wang, Self-assembled echinus-like nanostructures of mesoporous CoO nanorod@CNT for lithium-ion batteries, *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, pp. 6636–6641, 2011.

[5] P. Poizot, S. Laruelle, S. Grugeon, L. Dupont, and J. M. Tarascon, Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries, *Nature*, Vol. 407, pp. 496–499, 2000.
[6] M. Zhang, M. Q. Jia, Y. H. Jin, and X. R. Shi, Synthesis and electrochemical performance of CoO/graphene nanocomposite as anode for lithium ion batteries, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 263, pp. 573–578, 2012.
[7] Z. S. Wu, W. C. Ren, L. Wen, L. B. Gao, J. P. Zhao, Z. P. Chen, G. M. Zhou, F. Li, and L. M. Cheng, Graphene anchored with Co_3O_4 nanoparticles as anode of lithium ion batteries with enhanced reversible capacity and cyclic performance, *ACS Nano*, Vol. 4, pp. 3187–3194, 2010.
[8] Y. Deng, L. Wan, Y. Xie, X. Qin, G. Chen, Recent advances in Mn-based oxides as anode materials for lithium ion batteries, RSC Adv. 4 (2014) 23914–23935, doi: 10.1039/c4ra02686a

[9] Z. Cao, M. Qin, B. Jia, L. Zhang, Q. Wan, M. Wang, A .A . Volinsky, X. Qu, Facile route for synthesis of mesoporous Cr2O3 sheet as anode materials for Li-ion batteries, Electrochim. Acta 139 (2014) 76–81, doi: 10.1016/j.electacta.2014.06. 160 .

[10] A. Kraytsberg, A critical review-promises and barriers of conversion electrodes for Li-ion batteries, (2017) 1907–1923. doi:10.1007/s10 0 08-017-3580-9.

[11] X. Gui, G. Hao, W. Jiang, A comprehensive review of Cr, Ti-based anode mate- rials for Li-ion batteries, (2020) 1081–1099.

[12] H. Şahan, Lityum İyon Pillerde Katot Aktif Madde Olarak Kullanılan LiMn2O4 Bileşiğinin Elektrokimyasal Performansının Artırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.

[13] S. Yıldız et al, Multiwalled-Carbon-Nanotube-Modified Li2ZnTi3O8 as Anode with Improved Cycling Stability and Rate Capability for Lithium-Ion Batteries 2024 ECS Adv. 3 020501DOI 10.1149/2754-2734/ad3769

[14] G.N Suresh babu., N. Kalaiselvi MnCr2O4/graphene composite as a high-performance anode material for lithium-ion batteries, Electrochimica Acta, 372, 137855, 1-9, 2021.

[15] Z. Zhang, H. Zhao, Z. Zeng, C. Gao, J. Wang, Q. Xia Hierarchical architectured NiS @ SiO_2 nanoparticles enveloped in graphene sheets as anode material for lithium ion batteries, Electrochim. Acta., 155 (2015), pp. 85-92.

[16] Y.M. Lee, J.Y. Lee, H.-T. Shim, J.K. Lee, J.-K. Park SEI layer formation on amorphous Si thin electrode during precycling J. Electrochem. Soc., 154 (2007), p. A515.

[17] L.Y. Yang, H.Z. Li, J. Liu, S.S. Tang, Y.K. Lu, S. Te Li, J. Min, N. Yan, M. Lei, Li4Ti5O12 nanosheets as high-rate and long-life anode materials for sodium-ion batteries, J. Mater. Chem. A., 3 (2015), pp. 24446-24452.

DENİZCİLİKTE KULLANILAN HALATLARDA SÜPERHİDROFOBİK KAPLAMA UYGULAMASININ VE KOROZYON İLE TRİBOKOROZYON DİRENCİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Prof. Dr. Afşın Alper CERİT
Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Kayseri - Türkiye
ORCID: 0000-0002-3343-7976

Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nazlı ÖZSOLAK
Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Kayseri – Türkiye
ORCID: 0000-0001-6312-8675

Prof. Dr. Erkan YILMAZ
Erciyes Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü, Kayseri – Türkiye
ORCID: 0000-0001-8962-3199

Kadriye ERCİYESLİOĞLU BATIGÜN (Yüksek Lisans Öğrencisi)
Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Kayseri – Türkiye (Sorumlu Yazar)
ORCID: 0000-0001-9189-4115

Özet

Deniz ortamında kullanılan çelik halatlar; tuzluluk, yüksek nem, mekanik zorlanma ve tekrarlayan yük döngülerinin etkisiyle korozyon ve tribokorozyona maruz kalarak servis ömrü ve güvenilirlik açısından kritik riskler taşır. Bu derleme, çelik halatlarda korozyon/tribokorozyon mekanizmalarını ve mevcut koruma yaklaşımlarını (galvaniz, polimer/epoksi kaplamalar, yağlayıcılar, hibrit çözümler) sistematik olarak özetlemekte; özellikle süperhidrofobik kaplamaların (SHK) su/iyon geçişini azaltma, yüzey enerji düşürme ve kendi kendini temizleme etkileri üzerinden korozyon direncine katkısını değerlendirmektedir. Literatür taraması; SHK üretim yöntemleri (kimyasal daldırma, sol-jel, sprey, lazer/elektrokimyasal tekstürleme), kimyasal modifikasyonlar (uzun zincirli aminler, silanlar, fluor içeren ve fluor içermeyen alternatifler), performans metrikleri (temas/kayma açısı, EIS, tuz püskürtme, aşınma testleri) ve çok telli halat geometrisine özgü uygulanabilirlik zorluklarını (tel-tel temas, esneklik, kaplama sürekliliği) karşılaştırmalı olarak ele almaktadır. Bulgular, SHK'ların uygun formülasyon ve süreç parametreleriyle korozyon ve tribokorozyon etkilerini anlamlı ölçüde sınırlayabildiğini, ancak halatlara özgü karmaşık topolojide uzun dönem mekanik-bütünlük ve saha koşullarında dayanımın daha fazla kanıt gerektirdiğini göstermektedir. Bu araştırma, standart test protokollerinin (ASTM/ISO/TS EN) halat mimarisine uyarlanması, hibrit kaplama mimarileri ve fluor içermeyen sürdürülebilir kimyaların geliştirilmesi gibi araştırma boşluklarını vurgulamaktadır. Sonuç olarak, süperhidrofobik kaplamalar çelik halatlarda korozyon riskini azaltmaya yönelik umut verici bir yol sunmakta; endüstriyel uygulanabilirlik için yöntemsel optimizasyon, tribokorozyon altında uzun süreli performans ve gerçekçi saha validasyonu öncelikli araştırma gündemleri olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çelik halat, süperhidrofobik kaplama, uzun zincirli amin, korozyon, deniz ortamı

Giriş

Korozyon, metal ile çevresi arasındaki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu malzemenin bozunması olarak tanımlanmakta ve dünya ekonomisine yılda yaklaşık 2,5 trilyon doların üzerinde zarar vermektedir (Koch et al., 2016). Bu kayıplar yalnızca bakım ve yenileme maliyetlerini değil, aynı zamanda iş güvenliği ve çevresel riskleri de artırmaktadır (Revie & Uhlig, 2008).

Çelik halatlar, denizcilik, balıkçılık ve liman işletmeciliğinde yoğun olarak kullanılan kritik yük taşıyıcı elemanlardır. Ancak tuzlu su, yüksek nem ve tekrarlayan mekanik zorlamalar, galvaniz kaplamalı tellerde dahi kısa sürede korozyona yol açmaktadır. Geleneksel koruyucu çözümler olan galvaniz kaplama ve yağ bazlı sistemler, yalnızca sınırlı süre etkinlik göstermekte; yağ tabakası mekanik zorlamalar altında yüzeyden sıyrılarak koruyuculuğunu kaybetmektedir (Hawthorne & Proctor, 2013; Song & Zhang, 2019).

Son yıllarda, su temas açısının 150°'nin üzerinde olmasıyla tanımlanan süperhidrofobik kaplamalar, düşük yüzey enerjileri sayesinde metal yüzeyleri korozif ortamdan yalıtarak korozyon direncini artırmada önemli bir çözüm olarak öne çıkmıştır (Li & Zhang, 2016). Uzun zincirli aminler, yüzeye güçlü kimyasal bağlar oluşturarak kalıcı hidrofobik tabakalar meydana getirmekte ve bazı çalışmalarda madeni yağlara kıyasla daha ince uygulanmalarına rağmen daha yüksek korozyon direnci sağladıkları rapor edilmektedir (Zhou et al., 2020).

Literatürde süperhidrofobik kaplamalar üzerine yapılan araştırmaların çoğu düz yüzeyli çelikler veya alaşımlar üzerine yoğunlaşmıştır. Çok telli halat yapılarında kaplama uygulanabilirliği ve performansına dair derinlemesine çalışmalar ise oldukça sınırlıdır (Du, 2019). Bu çalışma, galvaniz kaplı çelik halatların korozyon direncini artırmak amacıyla uzun zincirli amin tabanlı süperhidrofobik bir kaplama geliştirmeyi ve kaplamanın performansını gerçekçi koşullar altında test etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın özgün yanı, yalnızca kaplama reçetesi geliştirmekle kalmayıp, aynı zamanda deniz ortamındaki tuzlu su ve mekanik yükleri eşzamanlı simüle eden bir prototip test sisteminin tasarlanıp uygulanmasıdır.

1. Çelik Halatlar: Yapı, Kullanım Alanları ve Korozyon Problemleri

1.1. Çelik Halatların Yapısal Özellikleri

Çelik halatlar, birçok ince çelik telin burulmasıyla oluşturulan, esneklik, yüksek çekme dayanımı ve darbe emme kapasitesi gibi özellikler sunan mekanik bileşenlerdir. Genellikle birkaç tel demetinden (strand) meydana gelir ve bu strandlar merkezi bir çekirdek etrafına sarılarak halat yapısını oluşturur. Çekirdek yapısı lif (fiber core) veya çelik (steel core) olabilir. Halatlar 6×19, 6×36 gibi tel/strand konfigürasyonlarına sahip olabilir. Tel çapı, sarım yönü, tel malzemesi (çoğunlukla yüksek karbonlu çelik) ve yüzey kaplaması (galvaniz veya paslanmazlık) halatın performansını doğrudan etkileyen unsurlardır (Costello, 1997).

1.2. Kullanım Alanları

Çelik halatlar; ağır yük taşıma, hareketli mekanizmalar ve zorlu çevresel koşullar gerektiren sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları:

- **İnşaat sektörü:** Vinçler, köprü askıları, asansör sistemleri
- **Madencilik:** Makaralı kaldırma sistemleri
- **Denizcilik:** Demirleme ve çekme sistemleri
- **Enerji sektörü:** Rüzgar türbinleri, iletim kuleleri
- **Ulaşım:** Teleferikler, tramvay sistemleri

Bu uygulamalarda halatlar sürekli nem, tuzlu su, sıcaklık değişimleri gibi zorlu koşullara maruz kalarak korozyon ve aşınma problemleri göstermektedir (Liu, 2020).

1.3. Korozyon Problemleri ve Etkileri

Çelik halatlar, yüksek mukavemetli karbon çeliğinden üretilmekte olup çok telli yapıları sayesinde esneklik ve taşıma kapasitesi sağlar. Ancak bu yapı, aynı zamanda geniş metalik yüzey alanı nedeniyle korozyona karşı daha hassastır. Halat tellerinde bulunan demir (Fe), nem, oksijen ve özellikle klorür iyonları ile temas ettiğinde hızla oksitlenir (Callister & Rethwisch, 2020). Bu durum, denizcilik, madencilik ve açık hava vinç sistemleri gibi alanlarda ciddi mühendislik sorunları yaratır (Feng et al., 2015).

Korozyon; halat çapının azalmasına, yüzey pürüzlülüğünün artmasına, tel-tel arası sürtünmenin yükselmesine ve yorulma dayanımının ciddi şekilde düşmesine yol açar. Bu bozulmalar, halatın kopma riskini artırarak can ve mal güvenliğini tehdit eder. Ayrıca erken kopma ve deformasyon, yüksek bakım-onarım maliyetlerine neden olur (Bockris & Reddy, 2002).

1.4. Korozyon Türleri

Çelik halatlarda başlıca görülen korozyon türleri şunlardır:

- **Genel (uniform) korozyon:** Tüm yüzeyde homojen metal kaybı; çapın azalmasıyla taşıma kapasitesini düşürür (Revie & Uhlig, 2008).
- **Galvanik korozyon:** Farklı elektrokimyasal potansiyele sahip metallerin temasında gelişir. Galvanizli tellerin paslanmaz bağlantı elemanlarıyla kullanılması, çinko tabakasının hızla tükenmesine yol açabilir (Fontana, 2005).
- **Çukurcuk (pitting) korozyonu:** Lokalize, derin oyuklarla ilerleyen tehlikeli bir korozyon türüdür; klorür iyonlarının bulunduğu ortamlarda yorulma dayanımını dramatik biçimde düşürür (Shreir, 2010).
- **Yorulma korozyonu:** Mekanik zorlanma ile kimyasal korozyonun birleştiği karmaşık bir süreçtir; mikro çatlakların büyümesine yol açar ve ani kopmalara neden olur (Barišić et al., 2016).

1.5. Korozyonun Gelişimi ve Etkileri

Korozyon genellikle dış yüzeyden başlar ve zamanla iç tellere doğru ilerler. Halatın dinamik hareketi ve tel-tel arası boşluklardan nemin girmesiyle bu süreç hızlanır. "Gizli korozyon" olarak bilinen iç korozyon, dışarıdan fark edilmediği için özellikle tehlikelidir (Melchers, 2017). Esneklik kaybı, yük dağılımında dengesizlik ve erken yorulma da korozyonun önemli sonuçlarındandır.

2. Korozyona Karşı Koruyucu Kaplamalar

Çelik halatların servis ömrünü uzatmak için en yaygın uygulama yüzey kaplamalarıdır. Bu kaplamalar, halat tellerini çevresel etkilerden yalıtarak korozyon hücrelerinin oluşumunu sınırlar. Galvaniz kaplama, polimer kaplamalar (PVC, PE), epoksi kaplamalar ve süperhidrofobik kaplamalar başlıca kullanılan yöntemlerdir. Kaplama türünün seçimi; kullanım ortamı, mekanik sürtünme, yük frekansı ve bakım koşullarına göre değişmektedir (Zhou et al., 2020).

3. Korozyonun Mekanik Performansa Etkisi

Korozyon yalnızca kimyasal bir bozulma değil, aynı zamanda halatların mekanik performansını doğrudan etkileyen bir sorundur. Literatürde, tel çapındaki %10'luk azalmanın taşıma kapasitesini %20–25 oranında düşürdüğü rapor edilmiştir (Cai et al., 2018). Korozyon; mikro çatlak oluşumu, tel-tel sürtünmenin artışı ve elastikiyetin kaybıyla birlikte halatın yorulma ömrünü ciddi ölçüde kısaltmaktadır (Liu et al., 2015).

4. Korozyon Test Yöntemleri ve Standartlar

Çelik halatların ömrünü değerlendirmek için çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır:

- **Tuz püskürtme testi (ASTM B117, ISO 9227):** %5 NaCl çözeltisiyle hızlandırılmış korozyon (Zhu et al., 2019).
- **Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS):** Kaplamanın iyon geçirgenliği ve korozyon başlangıcını belirler (Zhang et al., 2017).
- **Çekme ve kopma testleri (ISO 2408, ASTM A931):** Korozyona maruz bırakılmış halatın mekanik kapasitesini ölçer (Kim & Lee, 2014).
- **SEM/EDX analizleri:** Yüzey morfolojisi ve elementel bileşimin incelenmesi için kullanılır (Li et al., 2016).

Kaplama türlerine göre performans farklılıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kaplama türlerine göre performans özeti

Kaplama Türü	Korozyon Direnci	Mekanik Dayanım	Yüzey Sürtünmesi	Ekstra Özellik	Kaynak
Sıcak daldırma galvaniz	Yüksek	Orta	Orta	Kurban anot etkisi	Revie & Uhlig (2008)
Elektro-galvaniz	Orta	Orta	Düşük	Düzgün yüzey	Fontana (2005)
PVC/PE kaplama	Orta–Yüksek	Düşük–Orta	Düşük	Elektrik izolasyonu, estetik	Shreir (2010)
Epoksi kaplama	Yüksek	Orta	Düşük	Su/iyon geçirimsiz	Cai et al. (2018)
Süperhidrofobik kaplama	Çok yüksek	Orta	Çok düşük	Kendi kendini temizleme	Zhou et al. (2020)

6. Süperhidrofobik Yüzeyler

6.1. Temel Özellikler

Süperhidrofobiklik, temas açısının ≥150° ve kayma açısının ≤10° olduğu durumları tanımlar. Bu özellik sayesinde su damlaları yüzeye tutunmadan kolayca kayar; bu etki lotus yaprağında gözlemlenen “lotus etkisi” ile benzerlik taşır (Li & Zhang, 2016). Süperhidrofobik yüzeyler; kendi kendini temizleme, buzlanmayı önleme, oleofobiklik, tribolojik dayanım ve korozyon önleme gibi çoklu avantajlara sahiptir (Liu et al., 2017).

6.2. Korozyona ve Aşınmaya Etkisi

Bu yüzeyler, hapsolmuş hava cepleri sayesinde sıvı ile metal arasındaki gerçek temas alanını minimize ederek elektrokimyasal korozyonu sınırlar (Zhou et al., 2020). Böylece hem kimyasal korozyon hem de aşınmaya bağlı mekanik bozulmalar ciddi ölçüde azaltılabilir.

6.3. Literatürde Süperhidrofobik Kaplamalı Çelik Üzerine Çalışmalar

- Li et al. (2018), sıcak daldırma galvanizli çelik yüzeylere immersion yöntemiyle süperhidrofobik kaplama uygulamış, 164° temas açısı ve yüksek korozyon direnci rapor etmiştir.
- Du (2019), çok telli çelik halatlar üzerinde süperhidrofobik kaplamanın uygulanabilirliğini incelemiş ve literatürde sınırlı sayıda çalışma olduğunu vurgulamıştır.
- MDPI'de yayımlanan çalışmalar (2018, 2019), hiyerarşik mikro-nano yapıların florlu silanlarla modifiye edilmesiyle temas açısının 168°'ye kadar çıkarılabildiğini göstermiştir.

Bu bulgular, süperhidrofobik kaplamaların çelik halatlar için önemli bir potansiyel sunduğunu, ancak özellikle esnek yapılı çok telli kablolarda mekanik bütünlüğün korunmasına yönelik araştırmaların henüz sınırlı olduğunu göstermektedir.

2. Literatürdeki Deneysel Çalışmalar

Bu kısımda literatürdeki mevcut deneysel çalışmalar ve sonuçları incelenmiştir.Galvaniz kaplı çelik halatlar üzerinde uzun zincirli amin tabanlı süperhidrofobik kaplamaların korozyon ve tribokorozyon performansına ilişkin literatürü sistematik biçimde özetlemektedir. İncelenen çalışmalar; kaplama formülasyonları (amin türü ve konsantrasyonu), uygulama yöntemleri (daldırma süresi, çözeltinin derişimi, işlem sıcaklığı) ve süreç parametrelerinin optimize edilmesine yönelik yaklaşımlar açısından sınıflandırılmıştır.

- Yüzey karakterizasyonu: Literatürde kaplama sürekliliği ve homojenliği genellikle optik mikroskopi ve SEM ile değerlendirilmekte; süperhidrofobik davranış temas açısı ve kayma açısı ölçümleriyle doğrulanmaktadır (çoğu çalışmada temas açısı ≥150° hedefi raporlanmıştır).
- Korozyon ve tribokorozyon değerlendirmesi: Korozyon direnci; hızlandırılmış tuz püskürtme testleri (ASTM B117; tipik olarak %5 NaCl ve 240 saat ve üzeri süreler) ile ve yapay deniz suyu ortamlarında kurulan deney düzenekleriyle incelenmiştir. Çok telli halat mimarisine özgü çalışmalar, mekanik yüklerle eşzamanlı kimyasal etkileşimi simüle eden prototip sistemleri vurgulamakta ve kaplamalı/kaplamasız numuneler arasında korozyon ürünleri ile mekanik performansın karşılaştırmalı analizini sunmaktadır.
- Elektrokimyasal ve mekanik ölçümler: Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) kaplama bariyer özelliklerinin nicel değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmakta; çekme-kopma testleri (ISO 2408, ASTM A931) ve yüzey morfolojisi analizleri (SEM/EDX) ile kimyasal ve mekanik dayanım birlikte raporlanmaktadır.

Bu çerçeve, farklı çalışma tasarımlarını ortak metrikler üzerinden karşılaştırmaya imkân tanıyarak, uzun zincirli amin tabanlı süperhidrofobik kaplamaların çelik halatlar üzerindeki uygulanabilirliği, performans sınırları ve optimizasyon alanlarına ilişkin bütüncül bir değerlendirme sunar.

3.Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak, bu çalışma süperhidrofobik kaplamaların çelik halatlarda korozyon önleme konusunda güçlü bir potansiyel sunduğunu göstermekte olup, denizcilik ve ağır hizmet sektörleri için uzun vadede önemli bir uygulama alanı yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Çalışmanın sonuçları süperhidrofobik kaplamaların çelik halatlarda korozyonun önlenmesinde etkili olduğunu göstermiştir.

 Süperhidrofobik kaplamaların çelik halatlarda korozyonun önlenmesinde etkili olduğu bulgusundan hareketle, kaplama parametrelerinin endüstriyel ölçek öncesinde optimize edilmesi önerilir.

 Yapılan testlere göre korozyon direncinde %20'nin üzerinde iyileşme sağlandığından, farklı amin zincir uzunlukları, konsantrasyon aralıkları ve daldırma/sıcaklık süreçlerinin tasarım deneyi (DoE) yaklaşımıyla rafine edilmesi tavsiye edilir.

 Mekanik performansın olumsuz etkilenmediği ve tel-tel sürtünmenin azaldığı dikkate alınarak, yorulma ömrü, bükülme altındaki dayanım ve dinamik yükler altında tribokorozyon testlerinin genişletilmesi önerilir.

 Kimyasal korozyon ve tribolojik bozulmaların birlikte minimize edilmesi için, denizcilik ve ağır hizmet uygulamalarına özgü gerçekçi çevresel senaryolarda (sıcaklık-siklik, UV, tuz sisi–kuru-döngü) uzun vadeli saha testleri planlanmalıdır.

 Geliştirilen prototip test sisteminin, farklı yük spektrumları ve hız rejimleriyle kalibre edilerek standardize edilmesi; EIS, SEM/EDX ve çekme-kopma (ISO 2408, ASTM A931) testlerinden elde edilen verilerle doğrulanması önerilir.

 Süperhidrofobik kaplamaların mevcut galvanizli ve polimer bazlı sistemlerle hibrit olarak kullanılması değerlendirilmeli; çok katmanlı mimarilerle hem mekanik hem kimyasal dayanımın artırılması hedeflenmelidir.

References

 Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. NACE International, Houston, TX.

 Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470277270

 Hawthorne, H. M., & Proctor, T. (2013). The corrosion and degradation of steel wire ropes in marine environments. *Ocean Engineering*, 72, 51–60. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.06.002

 Song, Y., & Zhang, D. (2019). Corrosion protection of steel structures in marine environment: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(8), 1681–1692. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.02.012

 Li, X., & Zhang, D. (2016). Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: A review. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(18), 7017–7031. https://doi.org/10.1039/C6TA01684A

 Zhou, Q., Liu, Y., Chen, H., & Wu, L. (2020). Long-chain alkylamine-modified coatings for enhanced superhydrophobicity and corrosion resistance. *Corrosion Science*, 165, 108385. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108385

 Chongwei Du. (2019). Preparation of superhydrophobic steel surfaces with chemical stability and corrosion resistance. Applied Surface Science, 389, 952–960. https://doi.org/10.3390/coatings9060398

Costello, G. A. (1997). Theory of Wire Rope (2nd ed.). Springer Science & Business Media. ISBN 978-0387982021. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4612-1970-5

BORONIZING OF INNER SURFACE OF LIGHT FIREARM BARREL

Sadun KARABIYIK

Research Assistant, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon - Türkiye
skarabiyik@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3089-7501, +904623773114

Yasin ALEMDAĞ

Prof. Dr., Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon -Türkiye
yalemdag@ktu.edu.tr, (Corresponding Author) ORCID: 0000-0002-7470-4110, +904623774134

Furkan ALPTEKİN

R&D Engineer, TİSAŞ Trabzon Silah Sanayi A.Ş, Organize Sanayi Bölgesi, Nejmettin Karaduman Cd., Trabzon - Türkiye
furkanalptekin@trabzonsilah.com, ORCID: 0000-0002-6800-6535, +904627111323

Gençağa PÜRÇEK

Prof. Dr., Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon -Türkiye
purcek@ktu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4726-2257, +904623772941

ABSTRACT

In this study, inner surface of light firearm barrel was boronized using pack boronizing. Boronizing was performed in boron mixture consisting of 10 wt. % elemental amorphous boron and 90 wt. % potassium tetrafluoroborate (KBF_4). This process was carried out in a furnace at temperature of 900 °C for 3 hours. Microstructure of the barrel samples was examined with optical microscopy while their hardness was measured with Vickers micro hardness. In addition, scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffractometer were used to characterize the boronized layer. Results showed that boronizing created the iron boride layers consisting of Fe_2B and FeB phase on inner surfaces of barrel samples. The hardness of Fe_2B and FeB phases was determined as 1896 Hv and 2094 Hv, respectively. The average thickness of iron boride layer in the inner surface of barrels was measured as 98 μm and 80 μm for barrel lengths of 50 mm and 70 mm. In addition, it was observed that the iron boride layers exhibited a homogenous distribution on land, grooves and their intersections. The hardness of iron boride layer was found to be homogenous during barrel length, but their thickness showed slight changes from top to bottom of barrels.

Keywords: Boronizing, Pack Boriding, Barrel, Defence Industry, Firearms

INTRODUCTION

AISI 4140 (EN 42CrMo4) steel has been used in manufacturing of gears, tools, bolts and shafts (Zhang et al., 2024). This is due to its specific properties such as its high toughness after heat treatments and surface hardenability (Krauss, 1992). This steel has also been used as an alternative barrel steel in firearms (Koçyiğit, Yıldız, Gök, & Çay, 2020).

Diffusion based surface treatments have been performed on AISI 4140 steel in order to obtain higher hardness, corrosion and wear resistance (Çelik & Karadeniz, 1996; Joshi & Hosmani, 2014; Podgornik et al., 2001). Amongst them, nitriding and boronizing are still popular because of their ease applications, low investment costs, commercialized process steps and combinability with other processes (Fichtl, 1981; Funatani, 2004). Their higher surface hardness has been attributed to the formation of hard interstitial compounds on surfaces (Fichtl, 1981; Funatani, 2004).

In recent years, the boronizing has been gained an attraction by defence industry in order to decrease in erosion/wear in barrels (Hajek & Coufal, 2021; Joshi & Hosmani, 2014). This process has been considered as alternative for nitriding. Since the barrel is the most important part of a firearms, its endurance determines its service life. So far, the boronizing has generally been performed on outer surfaces of a few parts of firearms (Hajek & Coufal, 2021; Joshi & Hosmani, 2014). Limited works have been tried for boronizing of inner surfaces of barrel steels (Çep, 2022). It has been shown in these works, the inner surface of barrel can relatively be boronized, but inhomogeneous distribution of boride layers and its brittleness are still research topics for investigation (Çep, 2022). Therefore, this work aims to explore the boronizing of inner surface of light firearm barrel manufactured from AISI 4140 steel. In this context, inner surface of barrel was boronized, and distribution of boride layers and its hardness were systematically determined.

MATERIALS AND METHODS

The barrel samples manufactured from AISI 4140 steel were provided by Trabzon Silah Sanayi A.Ş (TİSAŞ). The barrels were designed as the inner diameter of 9 mm and outer diameter of 13.2 mm. Its chemical composition is determined as 0.432 % C, 1.19 % Cr, 0.757 % Mn, 0.18 % Mo, 0.0120 % Ni, 0.225 % Si, 0.0061 % P, 0.0028 % S, and 97.06 % Fe in wt. % via optical emission spectroscopy. In order to show the effect of sample geometry on boronizing, this process was performed on both flat samples and barrel samples having 50 mm and 70 mm length, as depicted in Figure 1a and b. The flat samples having 25 mm diameter and 5 mm thickness were prepared with wire-EDM and precisely ground with emery paper up to 2500 grit. The samples were placed into a cylindrical-shaped container including boronizing mixture. The container with diameter of 40 mm and height of 50 mm was prepared from stainless steel. The boron mixture was composed of 10 % wt. elemental amorphous boron and 90 % wt. KBF_4 (potassium tetrafluoroborate). After the container was sealed with flange bolt and nut, it was placed into furnace at a temperature of 900 °C. Three hours later, the container was extracted from furnace and cooled in air. By the contrary, the barrel samples were used as container, and it was filled with boronizing mixture. After its sealing, it was put into furnace at 900 °C for 3 hours and cooled in air.

The microstructures of the flat and barrel samples were examined with optical microscopy (OM). As shown in Figure 1c, the microstructural samples were taken from vertical and horizontal cross section of

certain distances of barrel. The standard metallography including grinding polishing and etching (etched 6 % Nital solution) was carried out on the samples after their hot mounting. The thickness of boride layers was measured on their microscopic images while their hardness was determined by using Vickers micro hardness tester. The X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope (SEM) and electron dispersive spectrometer (EDS) were used to identify phases on boride layers. Thickness and hardness measurements were repeated at least five times to ensure reliability of the results. The XRD analysis were conducted out at Bragg angles of 5°-95° with scan speed of 1 °/min.

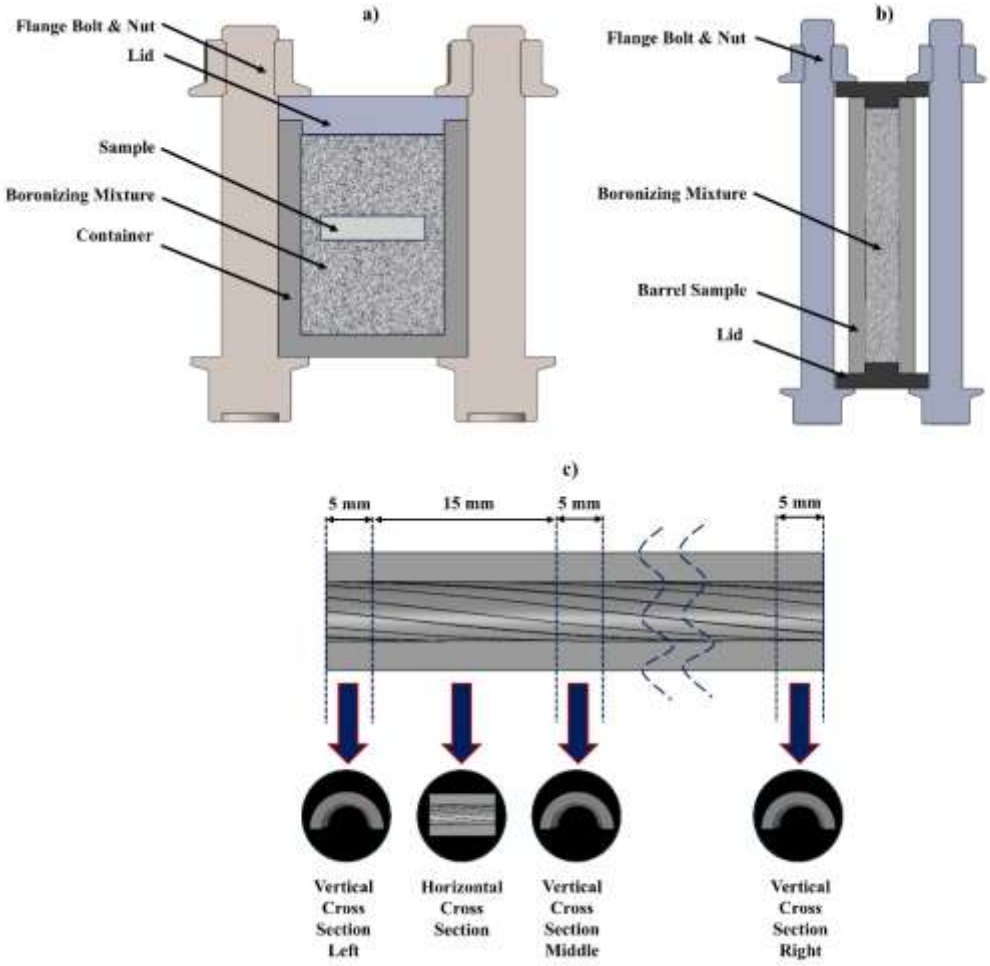


Figure 1. Schematic illustrations of boronizing process for a) flat samples, b) barrel samples and c) metallographic samples taken from the barrels

FINDINGS AND DISCUSSION

Boronizing created a dual phase iron boride layer on surface of flat samples, as seen in Figure 2. Their EDS results were documented in Table 1. The EDS and XRD showed that the outer layer is FeB having a thickness of 40.98 ± 8.32 µm while the inner is Fe_2B with thickness of 66.10 ± 17.75 µm. Total thickness of iron boride layers was measured as 107.62 ± 7.43 µm. On the other hand, a diffusion region was observed under Fe_2B. This zone included some insoluble elements reacted with boron. These observations are in good agreement with that of previous researchers suggesting that the formation of double phase iron boride layers and their thickness depends on their growth mechanism, boron concentration, time and temperature with steel composition (Joshi & Hosmani, 2014).

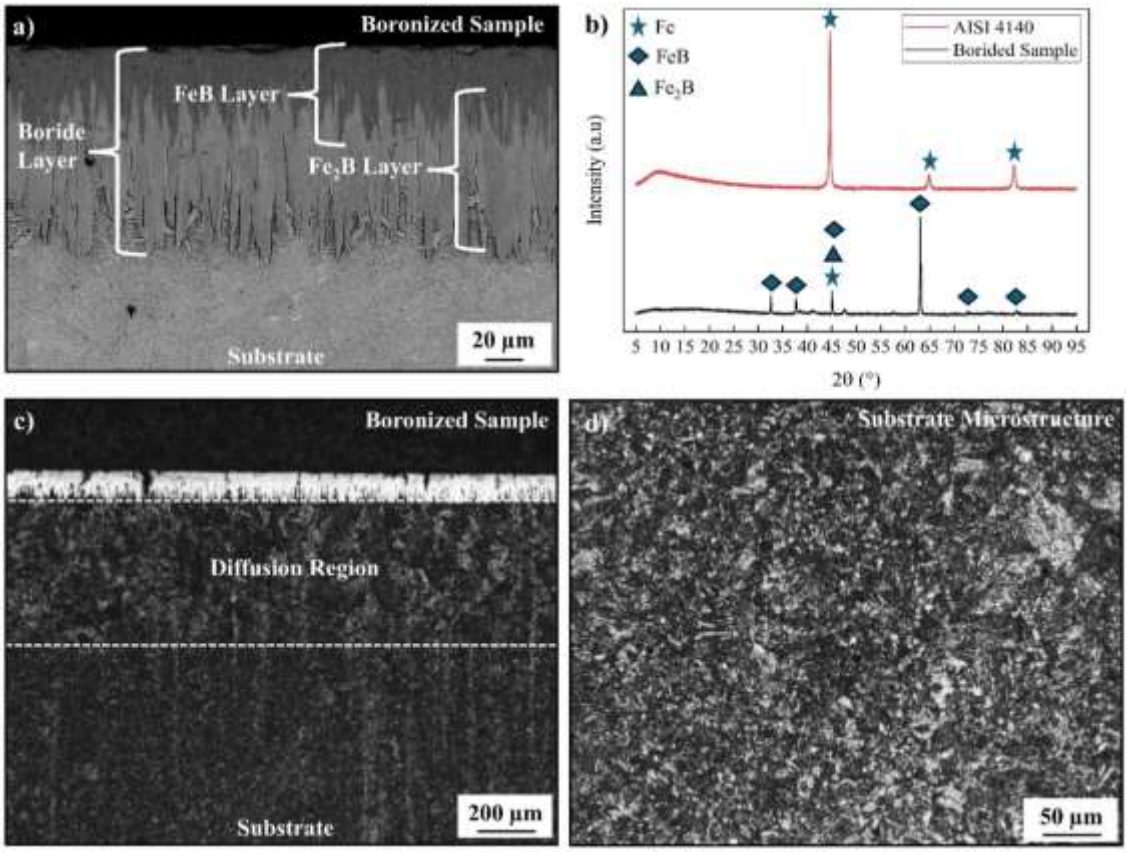


Figure 2. a) SEM image of the cross-section of the boronized sample, b) XRD result of AISI 4140 steel and borided sample, c) the cross-sectional OM image of boronized sample in etched condition and d) the OM image showing the microstructure of the substrate after boronizing

Table 1. EDS results of boronized sample

Element (% wt.)	FeB	Fe_2B	Substrate
B	55.4	48.3	-
Fe	40.9	47.4	78.3
C	0.3	2.2	10.1
Cr	1.3	0.7	5.3
O	1.7	0.8	2.7
Mo	-	-	3.2
Mn	0.4	0.6	0.4

The OM images of the vertical cross-sections taken from the middle of the barrel samples were given in Figure 3. This Fig showed that the inner surface of the barrels was successfully boronized and the boride layers (Fe_2B and FeB) exhibited almost same thickness on land and grooves, and their intersections. However, the thickness of the boride layer was observed to decrease from the top (left) to bottom (right) of barrels samples, as seen in Table 2. These findings may be related to reduce in boron concentration from top to bottom of barrels due to its cylindrical geometry.

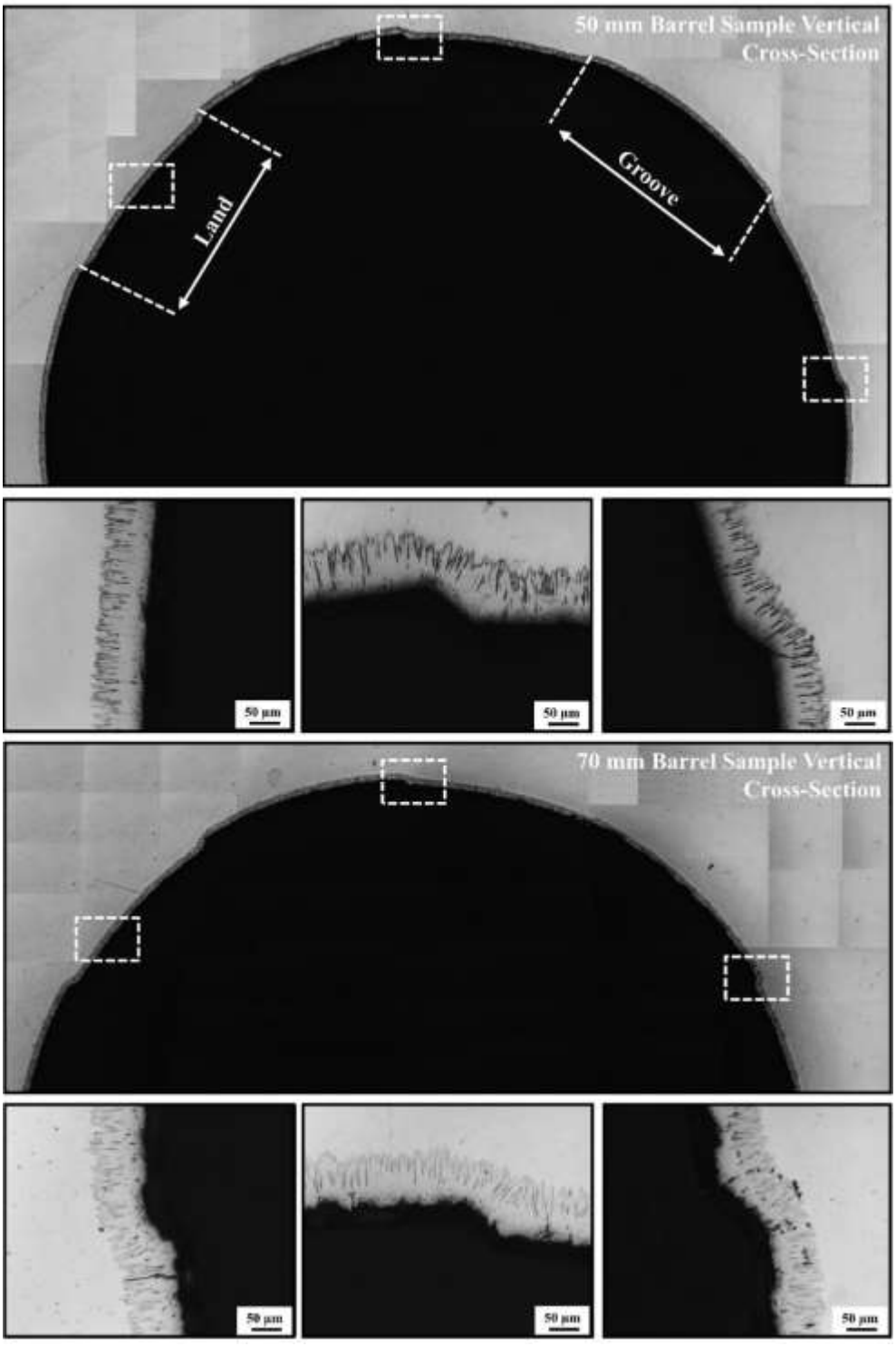


Figure 3. Vertical cross-sections of barrel samples

Table 2. Boride layer thickness measurements of vertical cross-sections of barrel samples

50 mm Barrel			70 mm Barrel		
Left	**Middle**	**Right**	**Left**	**Middle**	**Right**
110 ± 3 µm	95 ± 5 µm	90 ± 6 µm	87 ± 4 µm	87 ± 5 µm	64 ± 2 µm

The horizontal cross-sections of the barrel's samples with different lengths were given in Figure 4. As seen in figure, a stable and continuous boride layer were achieved in the inner surface of barrels. These results obtained from barrels were observed to be similar that of flat surfaces. This shows that the double phase iron boride layer with saw tooth morphology form on both flat and cylindrical surfaces. The microhardness of boride layers, diffusion layers and substrates for flat and barrel samples were documented in Table 3. As seen in Table 3, their hardness is almost the same, which indicate that the hardness was independent of sample geometry but dependent on their boron concentration (Kul, Danacı, Gezer, & Karaca, 2020).

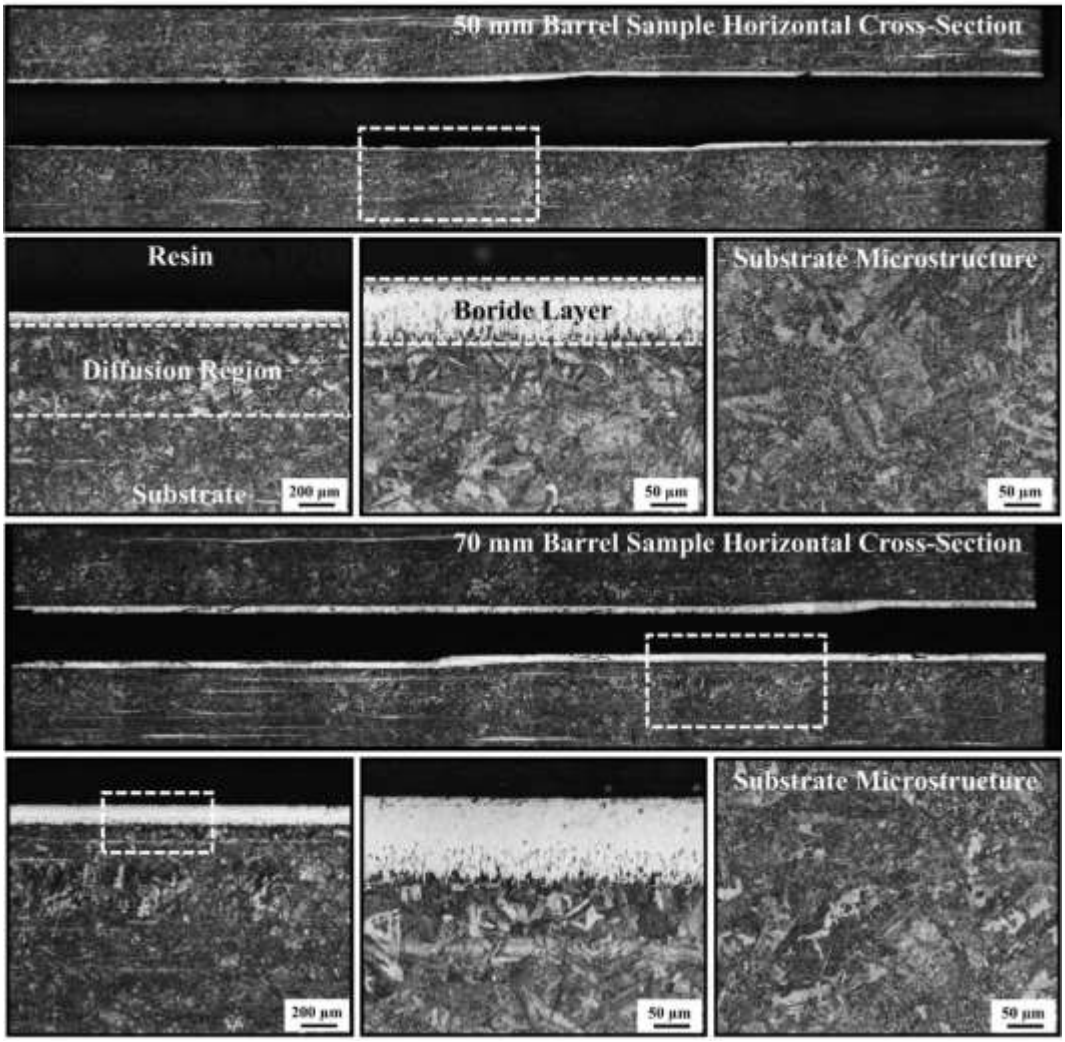


Figure 4. OM images of the horizontal cross-sections of barrel samples

Table 3. Microhardness values obtained from horizontal cross sections of barrel samples

Hardness Region	Boronized Sample	50 mm Barrel	70 mm Barrel
FeB	2155.5 ± 25.6	2042.3 ± 61.8	2086.45 ± 15.2
Fe_2B	1956.1 ± 60.6	1864.8 ± 44.8	1839.15 ± 27.1
Diffusion Layer	538.2 ± 4.1	485.8 ± 6.4	572.6 ± 17.45
Substrate	356.2 ± 3.6	359.4 ± 5.1	360.6 ± 12.1

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

In summary, the inner surface of barrels was successfully boronized with pack boronizing process. The iron boride layer exhibited a homogenous distribution on land, grooves and their intersections. However, the thickness of boride layers showed slight changes from top to bottom of barrels while its hardness was found to be almost the same during length of the barrel. As a result, it can be suggested that boronizing can be evaluated an alternative for inner surface treatment of AISI 4140 steel barrels. On the other hand, the performance of boronized barrels needs to be compared that of commercial barrels with firing tests.

THANKS AND INFORMATION NOTE

This work was conducted at Materials Research Laboratory of Mechanical Engineering Department in Karadeniz Technical University. The SEM/EDS and XRD analyses were performed at the Central Research Laboratories of Karadeniz Technical University. This work was supported by Scientific Research Projects Coordination Unit of Karadeniz Technical University (FDK-2022-10517) and a bilateral cooperation project between Karadeniz Technical University and Trabzon Silah Sanayi A.Ş (FSI-2025-16121). The authors thank everyone who assisted with the experiments and a special thanks for Trabzon Silah Sanayi A.Ş (TİSAŞ Arms) for their valuable contributions.

REFERENCES

Çelik, A., & Karadeniz, S. (1996). Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology, 80*(3), 283-286.

Çep, H. (2022). DIN 32CrMoV12-10 Çeliğinden Üretilen Namlu Ömrü ve Balistik Performansının Farklı Yüzey İşlemleri ile Geliştirilmesi. PhD Thesis, İstanbul Technical University, İstanbul.

Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials & Design, 2(6)*, 276-286.

Funatani, K. (2004). Low-Temperature Salt Bath Nitriding of Steels. *Metal Science and Heat Treatment, 46*(7), 277-281.

Hajek, J., & Coufal, V. (2021). Boronizing in Arms Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1178*(1), 012014.

Joshi, A. A., & Hosmani, S. S. (2014). Pack-Boronizing of AISI 4140 Steel: Boronizing Mechanism and the Role of Container Design. *Materials and Manufacturing Processes, 29*(9), 1062-1072.

Koçyiğit, F., Yıldız, F., Gök, M. S., & Çay, V. V. (2020). Dry-sliding wear behavior of AISI 4140 barrel steel at elevated temperatures. *Materials Testing, 62*(2), 189-195.

Krauss, G. (1992). Advanced surface modification of steels. *Journal of Heat Treating, 9*(2), 81-89.

Kul, M., Danacı, I., Gezer, Ş., & Karaca, B. (2020). Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel. *Materials Letters, 279*, 128510.

Podgornik, B., Vižintin, J., Wänstrand, O., Larsson, M., Hogmark, S., Ronkainen, H., & Holmberg, K. (2001). Tribological properties of plasma nitrided and hard coated AISI 4140 steel. *Wear, 249*(3), 254-259.

Zhang, Z., Wang, D., Liu, G., Qian, Y., Xu, Y., & Xiang, D. (2024). Surface Modification of 42CrMo Steels: A Review from Wear and Corrosion Resistance. *Coatings, 14*(3).

EVALUATING POSITIONAL ACCURACY IN DIGITAL MAPS: GNSS-BASED COMPARISON OF GOOGLE MAPS, YANDEX MAPS AND ATLAS

Ziya ÖNAL

Master's Student, Marmara University, Institute of Science and Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, İstanbul – Türkiye,

ziya421421@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5111-8822

İsmail İSTAY

Master's Student, Marmara University, Institute of Science and Technology, Department of Computer Engineering, İstanbul – Türkiye

ismailistay@gmail.com **(**Corresponding Author), ORCID: 0009-0009-0290-9799

Serkan AYDIN

Asst. Prof.Dr. Serkan AYDIN, Marmara University, Vocational School Of Technical Sciences , Department of Electronics And Automation, İstanbul-Türkiye,
serkanaydin55@gmail.com, ORCID:0000-0001-9530-520X

ABSTRACT

With advancing technology, digital maps and location services have become fundamental tools in numerous fields, including transportation, logistics, urban planning, land use, and defense industry. In this context, the accuracy of location data is critical to meeting user expectations in applications. This study aims to analyze positional accuracy performance of digital mapping platforms using high-precision GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers. For this purpose, two U-blox ZED-F9P-04B-01 GNSS receivers and two ANN-MB-00 multi-band GNSS antennas were used to conduct measurement studies. Data was collected independently and simultaneously from each receiver in the experimental setup. Time synchronization was applied to collected data and distance between two points was calculated using the Euclidean formula with satellite data sampled at one- second intervals. The average distance was derived from these calculations and resulting coordinate values were established as reference points for the first and second receivers. The reference coordinate values and physically measured distance between two points were input into Google Maps, Yandex Maps and the General Directorate of Mapping's Atlas platform to perform visual and metric positioning comparisons. The metric positions were measured using map screenshots and results were evaluated visually. Additionally, the study compared the update frequency, image clarity and satellite imagery representation across three platforms and assessing how accurately physical objects or structures were positioned and which system provided higher precision based on the measurements. The findings provide concrete data on which digital mapping platform is more suitable for engineering projects, academic research, geographic information system (GIS) applications and legal positioning

processes used by public institutions. Furthermore, by comparing high-accuracy GNSS data with spatial data offered by these maps, the study demonstrates degree of consistency between digital map services and real-world measurements in the sample area of Istanbul's Anatolian side.

Keywords: GNSS Receiver, Map, Maps' Accuracy, Maps' Comparative Analysis.

GİRİŞ

Günümüzde dijital harita servisleri, konum tabanlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve hem bireysel kullanıcılar hem de profesyonel sistemler için yön bulma, ulaşım optimizasyonu ve alan yönetimi gibi kritik görevleri yerine getirmektedir. Bu servislerin sağladığı konum doğruluğu, özellikle hassas navigasyon uygulamalarında ve coğrafi bilgi sistemlerinde (CBS) büyük önem taşımaktadır. Ancak Google Maps, Yandex Maps ve Atlas gibi popüler dijital harita platformlarının sunduğu konum verilerinin gerçek dünya koordinatlarıyla ne derece uyumlu olduğu, yani konumsal doğruluk seviyeleri, çoğu zaman sorgulanmaksızın kabul edilmekte ve sistematik olarak değerlendirilmemektedir.

Bu çalışmada, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tabanlı yüksek hassasiyetli konum belirleme sistemleri kullanılarak, söz konusu harita servislerinin sunduğu konum verilerinin doğruluğu karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneysel kurgu kapsamında, iki adet u-blox ANN-MB-00 GNSS (ANN-MB DataSheet) anteni ve iki adet u-blox ZED-F9P-04B-01 (ZED-F9P- 04B Data Sheet) GNSS alıcısı yardımıyla, sabit ve iyi tanımlanmış noktalarda gerçek konum verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu yüksek doğruluklu konumlar, Google Maps, Yandex Maps ve Atlas harita servislerinin gösterdiği konumlar ile karşılaştırılmış ve her bir harita servisinin sapma miktarları nicel olarak hesaplanmıştır.

Araştırmanın temel amacı, bu üç yaygın harita platformunun mutlak konumsal doğruluğunu nesnel olarak değerlendirmek ve uygulama geliştiricilere, coğrafi analiz uzmanlarına ve kullanıcılarına hangi platformun daha doğru sonuçlar sunduğu konusunda nesnel veriler sunmaktır. Elde edilen bulgular, özellikle GNSS ile entegre çalışan navigasyon sistemlerinin platform tercihlerinde karar destek amacıyla kullanılabilecektir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Donanım Altyapısı

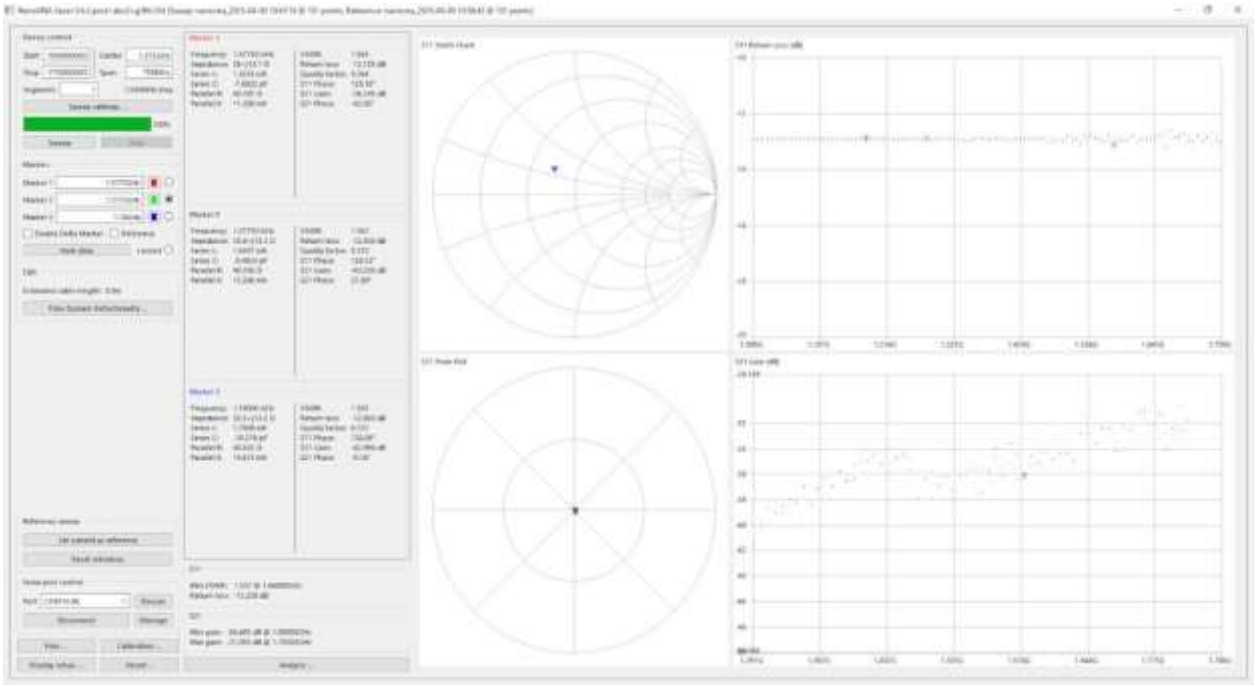
Donanım kısmında iki adet U-Blox ZED-F9P-04B-01 GNSS alıcısı ve iki adet U-Blox ANN-MB-00 GNSS anteni kullanılmıştır.

NanoVNA (Nano Vector Network Analyzer), düşük maliyetli bir Vektör Ağ Analizörü (VNA) donanımıdır. Bu tür yazılımlar kullanılarak RF (Radyo Frekans) bileşenlerinin ve anten sistemlerinin elektriksel özelliklerini ölçmeye yarar. Anten analizi yapılırken antenin empedansını ve SWR (Standing Wave Ratio) değerini ölçerek rezonans frekansını belirleyebilir. Örnek olarak bir antenin tam olarak hangi frekansta en iyi performans gösterdiğini bulabilir. Başka bir analiz yöntemi bant genişliğini analiz etmektir. Örnek olarak, bir antenin 140-150 MHz aralığında ne kadar verimli

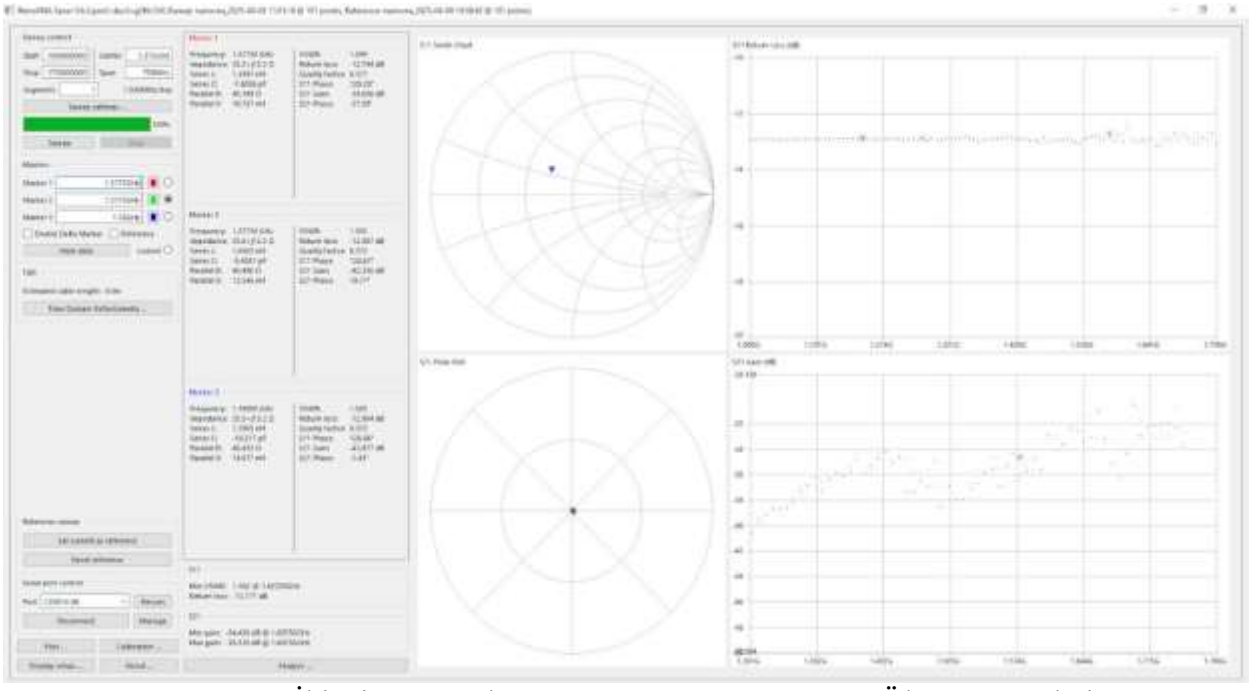
çalıştığını gösterebilir.

İki adet U-Blox ANN-MB-00 GNSS antenlerinin sinyal alış kalitelerinin karşılaştırılması için L1, L2 ve L5 Band doğrulaması yapılarak antenlerin kalibrasyonun GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri) sinyallerinin analizi gerçekleştirilmiştir. NanoVNA (“NanoVNA”, 2024) yazılımı kullanılarak L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) ve L5 (1176.45 MHz) bantlarında yapılan ölçümlerin aynı değerleri vermesi, hem donanım hem de yazılım açısından tutarlılığı kanıtlamaktadır. İki adet U-Blox ANN-MB-00 GNSS anteni ile yapılan ölçümlerde sapma olmaması, SDR'ların kalibrasyonunun doğru yapıldığını ve kararlı olduğunu kanıtlar.

Aşağıda sunulan Şekil 1. ve Şekil 2.’de iki farklı antenimizin GPS uydularının çalışma frekansı olan L1, L2 ve L5 (Zhao, Blunt, & Yang, 2022) bantlarındaki ölçüm kaliteleri ve antenlerin kalibrasyonu sunulmuştur.



Şekil 1. İlk Anten Alıcısına Ait L1, L2 ve L5 Bant Ölçüm Değerleri



Şekil 2. İkinci Anten Alıcısına Ait L1, L2 ve L5 Bant Ölçüm Değerleri

Deney Altyapısı

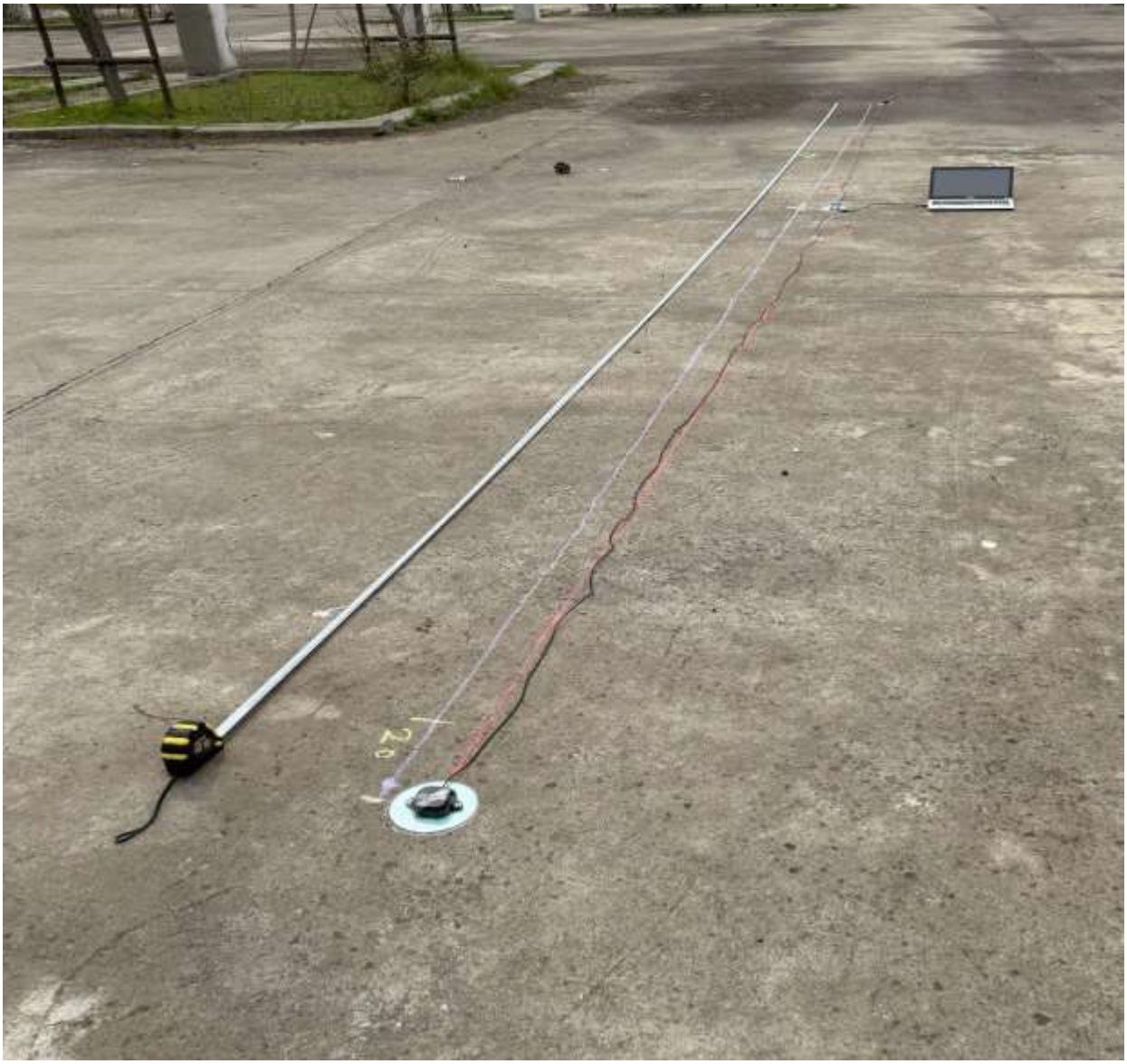
Alıcı modülleri (entegre merkezleri) arasındaki mesafe 15 cm, anten giriş kısmı 20 cm, antenler arası mesafe 1020 cm olacak şekilde bir kurulum yapılmıştır. Kuruluma ait resim görüntüleri Şekil 3 ve



Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 3. Deney Düzeneğine Ait Mesafelerin Gösterimi

Kırmızı tebeşirle yapılan çizimler, bir anten ile ona bağlı alıcı cihaz arasındaki 500 cm'lik mesafeyi ve her iki alıcı üzerinde yer alan anten giriş noktaları arasındaki 20 cm'lik uzaklığı temsil etmektedir. Beyaz tebeşirle yapılan çizim ise, iki U-Blox işlemcisi arasında bulunan 15 cm'lik mesafeyi göstermektedir.



Şekil 4. Deney Düzeneğine Ait Mesafelerin Gösterimi

Elde Edilen Veriler İçin Kullanılan Metod

Üç boyutlu uzayda yer alan, $P \square (P_X, P_Y, P_Z)$ ve $Q \square (Q_X, Q_Y, Q_Z)$ noktaları için öklid uzaklığı (Uzun, 2013) şu şekilde hesaplanır:

$$d \square P \square Q \square \sqrt{(P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2 + (P_z - Q_z)^2}$$

Yukarıda belirtilen formüle ulaşıldıktan sonra ölçüm ve hesaplamalar için aşağıdaki adımların uygulanarak sonuca ulaşılması hedeflenmektedir:

- GNSS alıcılarından ölçüm yapılması
- Ölçüm verilerinin senkron edilmesi
- Her bir veri için konumlar arası mesafenin hesaplanması

- Hesaplanan mesafelere göre ortalama değerin bulunması
- Bulunan ortalama değere göre konumların harita sistemlerinde karşılaştırmaların yapılması
- Hesaplanan mesafelerden fiziksel mesafeye en yakın değerin bulunması
- Bulunan fiziksel mesafeye en yakın değere göre konumların harita sistemlerinde karşılaştırmaların yapılması

COM-3 ve COM-5 (1. Alıcı ve 2. Alıcı Haberleşme Port İsimleri) alıcılarından saniye bazında zaman senkronizasyonu sağlanarak elde edilen toplam 1287 veri çifti kullanılarak, her bir zaman anı için iki alıcı arasındaki mesafe ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda 1287 adet mesafe değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu mesafe değerlerinin aritmetik ortalaması aşağıda gösterilen formüle göre hesaplandığında, iki alıcı arasındaki ortalama mesafe 10,62389718 metre olarak bulunmuştur.

$$\text{Ortalama Mesafe Değeri} = \frac{(d_1 + d_2 + \ldots + d_n)}{n}$$

d: Öklid Formülü *Kullanılarak Ulaşılan Mesafe Değeri*, n: *Hesaplanan Mesafe Değeri Adedi* Filtre ve ilave düzeltme algoritmaları kullanılmadan ham gnss verileri kullanılmıştır. Bağlı olan anten ve alıcı karakteristiğine göre 10.62-10.20~=0.42 metre ±%5 hata payıyla ölçüm yapılmıştır.

COM-3 ve COM-5 alıcılarının ölçüm başlangıç ve bitiş zamanları, yine bu alıcıların hesaplanan ortalama mesafe değerine en yakın değer (10,63014581) referans alınarak elde edilen konum verileri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

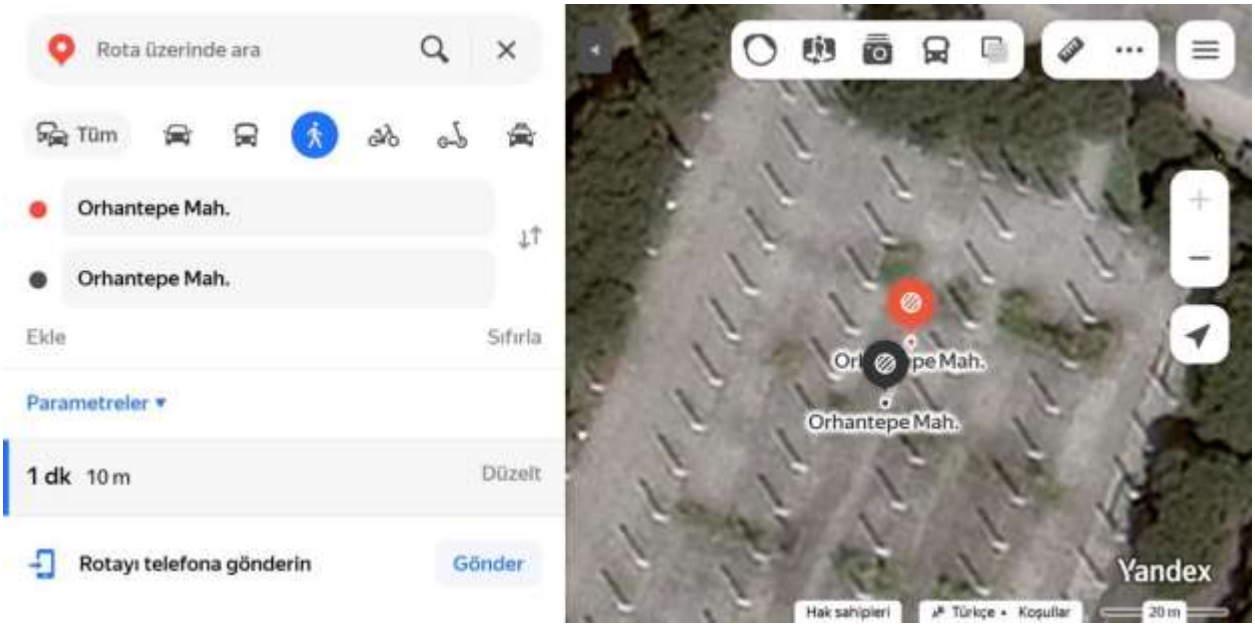
Tablo 1. Birinci Referans Konum Değerleri

Alıcılar	Tarih/Saat Başlangıç	Tarih/Saat Bitiş	Konum
COM3	26/03/2025 09:01:32	26/03/2025 09:22:58	40.90447817 29.15610217
COM5	26/03/2025 09:01:32	26/03/2025 09:22:58	40.90439317 29.15605483

ÖLÇÜM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

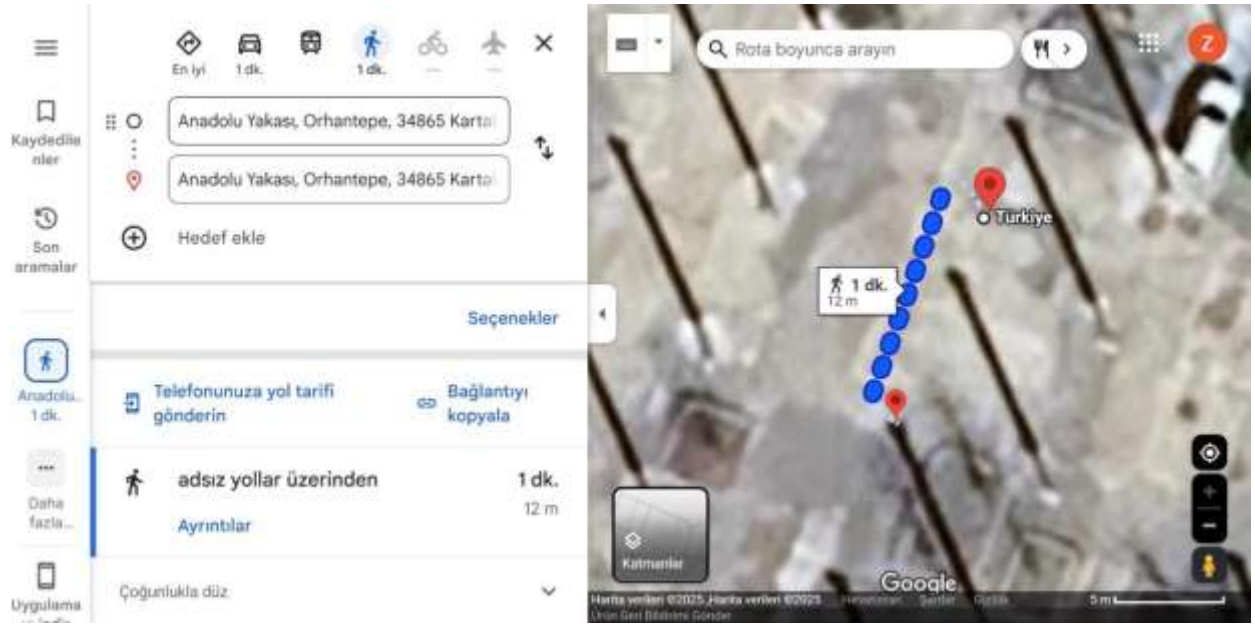
COM-3 ve COM-5 için Tablo 1'den elde edilen referans koordinat değerleri ve fiziksel olarak iki nokta arasında ölçülen mesafenin doğruluğunun incelenebilmesi için sırasıyla Yandex Maps Google Maps ve Harita Genel Müdürlüğü Atlas'a girilerek görsel ve metrik konumlandırma karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmaya ait inceleme görüntüleri Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterimleri yapılmıştır.

Yandex Maps için Şekil 5'de, iki alıcıdan elde edilen konumlar arası mesafenin 1000 cm olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu mesafe, fiziksel olarak ölçülen 1020 cm'lik değerden 20 cm daha azdır. Bu durum, Yandex Maps platformunda gözlemlenen konumsal sapmayı ve sistemin gerçek dünya verilerine göre yaklaşık 20 cm'lik bir farkla konumlandırma yaptığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Yandex Maps'in Birinci Referans Konum Değerlerine Göre Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

Google Maps için Şekil 6'da, iki alıcıdan elde edilen konumlar arası mesafenin 1200 cm olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu mesafe, fiziksel olarak ölçülen 1020 cm'lik değerden 180 cm daha fazladır. Bu durum, Google Maps platformunda gözlemlenen konumsal sapmayı ve sistemin gerçek



dünya verilerine göre yaklaşık 180 cm'lik bir farkla konumlandırma yaptığını ortaya koymaktadır.

Şekil 6. Google Maps'in Birinci Referans Konum Değerlerine Göre Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

HGM Atlas platformu için Şekil 7'de elde edilen konum verileri sisteme girildiğinde, ölçüm yapılan iki farklı konumdan ziyade, yalnızca tek bir konum (açık mavi renkli nokta) görüntülenmiştir. Bu durum, iki ayrı alıcıdan alınan verilerin sistemde tek bir noktada birleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, konumlar arası mesafe hesabı yapılamamıştır. Harita üzerinde görülen kırmızı ve mavi noktalar ise, ölçüm noktalarını temsilen manuel olarak işaretlenmiştir.



Şekil 7. Harita Genel Müdürlüğü Atlas'ın Birinci Referans Konum Değerlerine Göre Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

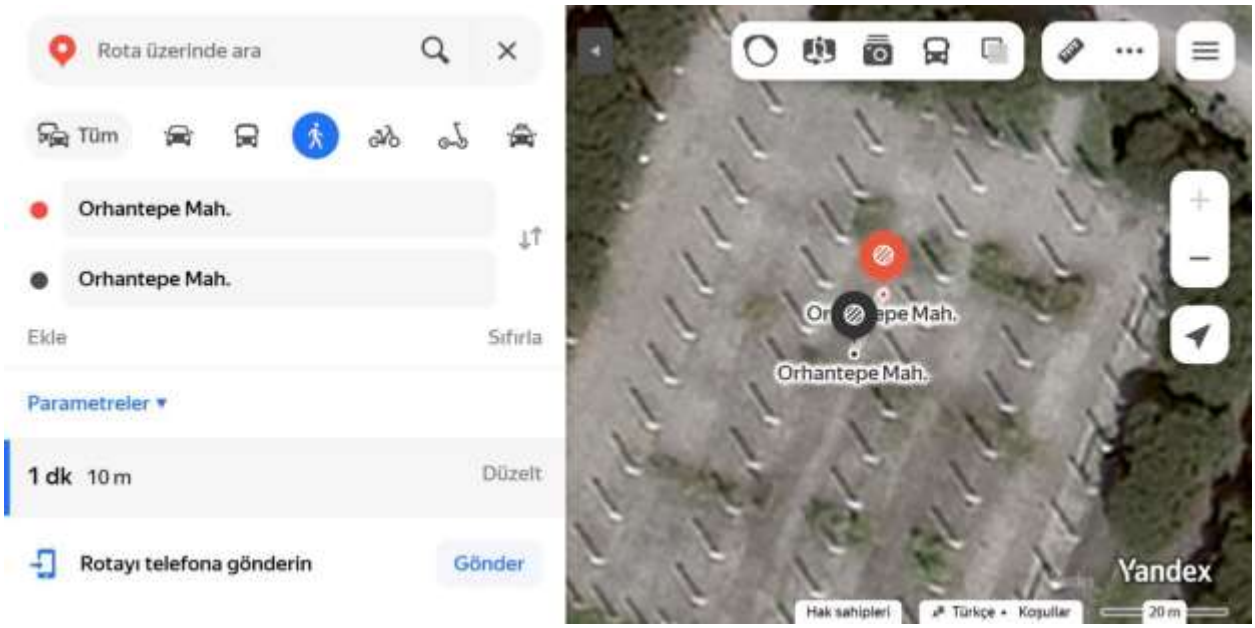
COM3 ve COM5'ten alınan 1287 adet zaman senkronizasyonlu veriler için aradaki mesafe ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamanın sonucunda 1287 adet mesafe değeri elde edilmiştir. Elde edilen mesafe değerlerinden fiziksel olarak ölçülen 1020 cm mesafeye en yakın mesafe değeri olan 1029,563014 cm referans alınarak Tablo 2'de sunulan değer tespit edilmiştir. GNSS alıcısıyla herhangi bir algoritma ve filtreleme kullanılmadan oluşan 1029.5 - 1020= 9.5cm ±%1lik hata payı giderilememiştir. Bunun için filtreleme ve düzeltme algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Bu fark DGPS (Fark GPS'si) ve ya RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) algoritma ve hesaplamalarıyla santimetre seviyelerine indirildiği beyan edilmektedir (Gomez-Gil, Ruiz- Gonzalez, Alonso-Garcia, & Gomez-Gil, 2013).

Tablo 2. İkinci Referans Konum Değerleri

Kişiler	Tarih/Saat Başlangıç	Tarih/Saat Bitiş	Konum

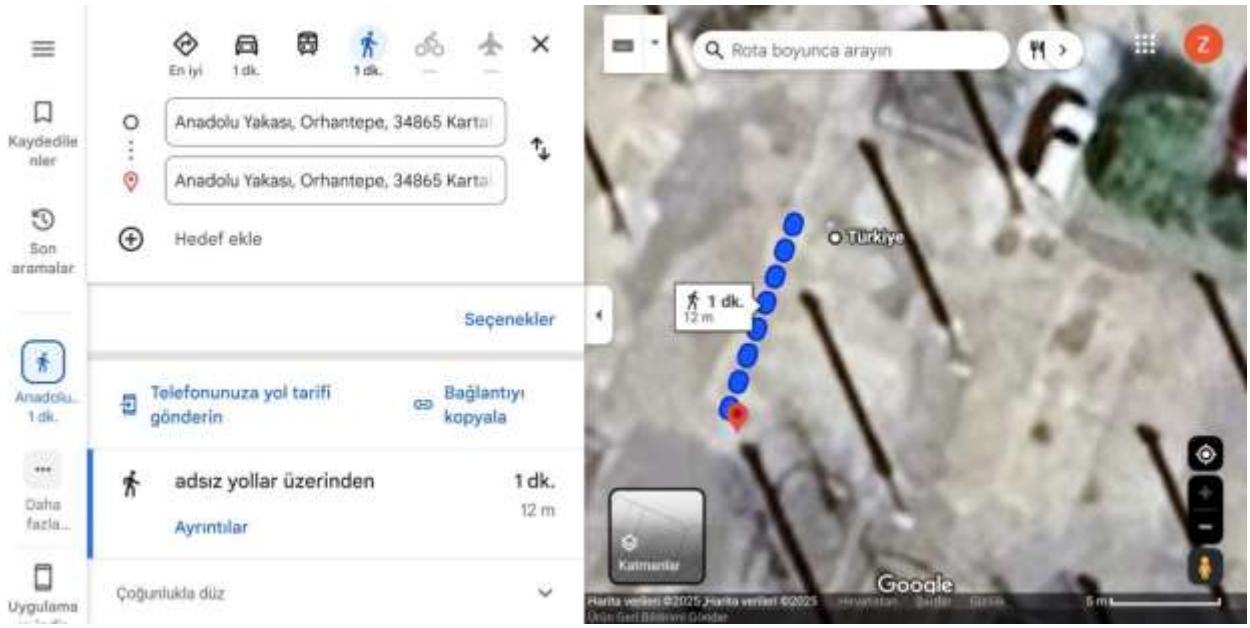
COM3	26/03/2025 09:01:32	26/03/2025 09:22:58	40.90447933 29.15610100
COM5	26/03/2025 09:01:32	26/03/2025 09:22:58	40.90439667 29.15604700

Yandex Maps için Şekil 8'de, iki alıcıdan elde edilen konumlar arası mesafenin 1000 cm olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu mesafe, fiziksel olarak ölçülen 1020 cm'lik değerden 20 cm daha azdır. Bu durum, Yandex Maps platformunda gözlemlenen konumsal sapmayı ve sistemin gerçek dünya verilerine göre yaklaşık 20 cm'lik bir farkla konumlandırma yaptığını ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Yandex Maps'in İkinci Referans Konum Değerlerine Göre Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

Google Maps için Şekil 9'da gösterildiği üzere konum analizi yapıldığında, iki alıcıdan elde edilen konumlar arası mesafenin 1200 cm olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu mesafe, fiziksel olarak ölçülen 1020 cm'lik değerden 180 cm daha fazladır. Bu durum, Google Maps platformunda gözlemlenen konumsal sapmayı ve sistemin gerçek dünya verilerine göre yaklaşık 180 cm'lik bir farkla konumlandırma yaptığını ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Google Maps'in İkinci Referans Konum Değerlerine Göre Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

HGM Atlas platformu için Şekil 10'da elde edilen konum verileri sisteme girildiğinde, ölçüm yapılan iki farklı konumdan ziyade, yalnızca tek bir konum (açık mavi renkli nokta) görüntülenmiştir. Bu durum, iki ayrı alıcıdan alınan verilerin sistemde tek bir noktada birleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla, konumlar arası mesafe hesabı yapılamamıştır. Harita üzerinde görülen kırmızı ve mavi noktalar ise, ölçüm noktalarını temsilen manuel olarak işaretlenmiştir.



Şekil 10. Harita Genel Müdürlüğü Atlas'ın İkinci Referans Konum Değerlerine Göre

Oluşturduğu Uydu Görüntüsü

Yapılan ölçümler ve karşılaştırmalar doğrultusunda, fiziksel mesafeye ve gerçek konumlara en yakın işaretleme ve hesaplama yapan sistemin Yandex Maps olduğu gözlemlenmiştir. Google Maps ise, Yandex Maps kadar yüksek doğrulukta olmasa da, nispeten doğru ve kabul edilebilir ölçümler sağlamıştır. Ancak her ülkenin kendi konum belirleme sistemlerinin yüksek doğrulukta sonuçlar üretmesi günümüzde büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, Harita Genel Müdürlüğü'ne ait Atlas Uygulaması, girilen koordinatlara karşılık beklenen konumdan oldukça uzak ve yalnızca tek bir sabit nokta göstermesi nedeniyle yetersiz bulunmuştur.

Tablo 3. Birinci ve İkinci Referans Konumları Harita Karşılaştırma Değerleri

	Ölçülen Mesafe Değeri(m)	GNSS Konum Ölçüm Farkları Değeri +- %5(ECEF'e göre hesaplanan)	Sayısal Harita Farkı(m)	Ölçüm Farkı(m)
HGM Atlas	10.20	10.62	Fark Gösterilemiyor	-
Google	10.20	10.62	12	2
Yandex	10.20	10.62	10	0.2

SONUÇ VE ÖNERILER

Yandex Maps, özellikle Rusya ve çevresindeki bölgelerde yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri ve detaylı harita verisi kullanmaktadır. Kullandığı coğrafi referans sistemleri, güncel uydu verileri ve yüksek doğruluklu harita projeksiyonları sayesinde konumlar oldukça hassas yerleştirilebilmektedir. Bu nedenle fiziksel konuma çok yakın (~20 cm fark) sonuçlar elde edilmiştir.

Google Maps, global ölçekte çalışan bir platform olup farklı bölgelerde farklı hassasiyet seviyeleri gösterebilir. Uydu görüntülerinin çözünürlüğü ve güncelliği, bazı alanlarda ±1–3 metre arasında değişen sapmalara neden olabilmektedir. Ayrıca sistemin kullandığı WGS 84 koordinat sistemi ile harita projeksiyonları arasındaki dönüşüm kaynaklı konum kaymaları da görülebilir. Harita Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen HGM Atlas, öncelikli olarak askeri ve jeodezik kullanım için tasarlanmıştır. Bu nedenle kullanıcı arayüzü, hassas sivil yerelleştirme amaçları için optimize edilmemiş olabilir. Girilen koordinatların sistem içinde farklı projeksiyonlarla (ör. ED50, ITRF, vs.) dönüştürülmesi, sabit grid noktasına yönlendirme ya da ölçek farkları gibi etkenler yaklaşık 50 metrelik sapmalara yol açabilir (Conti, 2021).

Genel Değerlendirme yaparsak

Bu farkların temel nedenleri:

- Harita sistemlerinin kullandığı koordinat referans sistemleri (ör. WGS 84, ED50,

ETRS89) (Demirtaş, 2006),

- Uydu görüntüsü çözünürlüğü ve güncelliği (Adedeji, Owoade, Ajayi, & Arowolo, 2022),
- Projeksiyon ve dönüşüm algoritmaları (Alazawi vd., 2014),
- Sistemlerin sivil ya da askeri odaklı geliştirilmeleri (Fernandez-Prades, Presti, & Falletti, 2011),
- Kullanıcı arayüzlerinde yapılan otomatik düzeltmeler veya genelleştirmeler (Li vd., 2017)
- Uydu fotoğraflarının çekim açısı ve düz harita olarak basım ve konumlandırma tekniği hataları

Uydu ve Seyrüsefer teknolojilerinin gelişmesi hızlıca devam etmektedir. Yalnız 2025 yılı itibariyle yapılan ölçümler ve analizler sonucunda harita sistemleri arasında konumsal doğruluk bakımından belirgin farklar tespit edilmiştir. Bu farkların azaltılması ve harita sistemlerinin daha yüksek doğrulukla sonuçlar verebilmesi için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

1. Güncel ve Yüksek Çözünürlüklü Uydu Verilerinin Kullanımı:

Harita sistemlerinin doğruluk düzeylerini artırabilmeleri için, daha sık aralıklarla ölçülen güncellenen, kalibre edilen ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleriyle ilişkilendirilmiş veri altyapılarının kullanılması önem arz etmektedir. Bu sayede sahadaki fiziksel değişiklikler sistemlere daha hızlı yansıtılabilir.

2. Koordinat Referans Sistemlerinin ve Dönüşüm Algoritmalarının Standardizasyonu:

Farklı sistemler farklı koordinat sistemleri (ör. WGS 84, ED50, ITRF) kullanabilmektedir. Ulusal ve uluslararası düzeyde referans sistemlerinin standardize edilmesi ve dönüşüm algoritmalarının şeffaf bir şekilde paylaşılması, konumsal tutarlılığın artırılmasına katkı sağlayacaktır.

3. Yerel Veri Entegrasyonu ve Sivil Kullanım Optimizasyonu:

Harita servislerinin, yerel yönetimler ve ulusal kurumlarla iş birliği yaparak bölgesel coğrafi veri kümelerini entegre etmeleri, özellikle ülke içi hassas ölçüm ihtiyaçlarında doğruluğu artırabilir .

Ayrıca sistem arayüzlerinin yalnızca askeri değil, sivil kullanıcılar için de optimize edilmesi gerekmektedir.

1. Kullanıcı Geri Bildirimlerinin Sistematik Olarak Toplanması:

Harita sistemlerinin sahadaki doğruluğunu iyileştirmek adına, kullanıcıların konum sapmaları raporlayabildiği ve sistemlerin bu geri bildirimlerle veri doğrulama süreçlerini güçlendirdiği topluluklar ve mekanizmalar kurulmalıdır.

2. Açık Erişimli ve Şeffaf Doğruluk Raporlarının Yayınlanması:

Tüm harita platformlarının, sistemlerinin konumsal doğruluk performansını bölgesel bazda raporlayarak kamuoyuyla paylaşması, kullanıcıların bilinçli tercih yapmasına olanak tanırken sistemler arası şeffaf bir karşılaştırma ortamı sağlar.

3. Bilimsel Çalışmaları:

Bilim insanları tarafından geliştirilen alıcı teknolojileri ve düzeltme algoritmaları kullanılarak ölçümler yapılmalı ve elde edilen sonuçlar kamuoyuna duyurulmalıdır.

KAYNAKÇA

Adedeji, O., Owoade, P., Ajayi, O., & Arowolo, O. (2022, Temmuz 29). Image Augmentation for Satellite Images.arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.14580

Alazawi, E., Abbod, M., Aggoun, A., Swash, M. R., Fatah, O. A., & Fernandez, J. (2014). Super depth-map rendering by converting holoscopic viewpoint to perspective projection. 2014 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), 1-4. Budapest, Hungary: IEEE. https://doi.org/10.1109/3DTV.2014.6874714 Conti, M. (2021). Satellite Systems in the Era of 5G Internet of Things. Demirtaş. (2006). Bölgesel Koordinat Dönüşümleri.
Fernandez-Prades, C., Presti, L. L., & Falletti, E. (2011). Satellite Radiolocalization From GPS to GNSS and Beyond: Novel Technologies and Applications for Civil Mass Market. Proceedings of the IEEE, 99(11), 1882-1904. https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2158032

Gomez-Gil, J., Ruiz-Gonzalez, R., Alonso-Garcia, S., & Gomez-Gil, F. (2013). A Kalman Filter Implementation for Precision Improvement in Low-Cost GPS Positioning of Tractors. Sensors, 13(11), 15307-15323. https://doi.org/10.3390/s131115307

Li, J., Meng, Q., Zhang, G., Sun, Y., Qiu, L., & Ma, W. (t.y.). Automatic Modulation Classification Using Support Vector Machines and Error Correcting Output Codes

NanoVNA. (2024). IEEE Microwave Magazine, 25(8), 2-2. https://doi.org/10.1109/MMM.2024.3412291

Uzun, M. Z. (2013). Karayollari üstyapi profil verilerinin mobil cihaz ile konuma bağlı elde edilmesi.

Zhao, L., Blunt, P., & Yang, L. (2022). Performance Analysis of Zero-Difference GPS L1/L2/L5 and Galileo E1/E5a/E5b/E6 Point Positioning Using CNES Uncombined Bias Products. Remote Sensing, 14(3), 650.https://doi.org/10.3390/rs14030650

Yandex Harita Ölçüm Yapılan Yerin Linki, Erişim Tarihi: Nisan 2025

https://yandex.com.tr/harita/11508/istanbul/?ll=29.158751%2C40.903342&mode=search&sll=29.156101%2C40.904479&text=40.904479%2C29.156101&z=16.92

Google Harita Ölçüm Yapılan Yerin Linki, Erişim Tarihi: Nisan 2025

https://www.google.com/maps/place/40%C2%B054'16.1%22N+29%C2%B009'22.0%22E/@40.9044833,29.1535261,17z/data=!3m1!4b1!4m4!3m3!8m2!3d40.9044793!4d29.156101?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDYxMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Atlas Harita Ölçüm Yapılan Yerin Linki, Erişim Tarihi: Nisan 2025

https://atlas.harita.gov.tr/#17/40.904823/29.15663

ANN-MB_DataSheet Erişim Tarihi: Nisan 2025

https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ANN-MB_DataSheet_UBX- 18049862.pdf

ZED-F9P-04B DataSheet Erişim Tarihi: Nisan 2025
https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P-04B_DataSheet_UBX-21044850.pdf

IMPLEMENTATION OF BOOST CONVERTER-BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKING AND OPTIMIZATION ALGORITHMS IN PORTABLE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS FOR MILITARY APPLICATIONS

Mustafa Şeker, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Türkiye, (Corresponding Author) ORCID: 0000-0002-3793-8786
Emre Ünsal, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Müh. Bölümü, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6042-0742
Ahmet Aksöz, Kayseri Üniversitesi, MMTF, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2563-1218
Saadin Oyucu, Gazi University, Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3880-3039

Abstract

Photovoltaic (PV) systems have emerged as a strategic energy solution in military applications due to their advantages such as silent operation, low energy cost, and fuel-free power generation. However, sudden changes in environmental conditions can adversely affect the energy production efficiency of PV systems, posing a significant vulnerability in military operations where energy continuity is of critical importance. Therefore, ensuring that PV systems operate at maximum efficiency under all conditions necessitates the effective implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques. In this study, in addition to conventional MPPT algorithms such as Perturb & Observe (P&O) and Incremental Conductance (IC), the performance of recent optimization-based methods in tracking the maximum power point has been investigated. In particular, the effects of modern metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Bat Algorithm (BA), Artificial Bee Colony (ABC), Hybrid Genetic Algorithms (Hybrid GA), Reptile Search Algorithm (RSA), and the Grey Wolf Optimizer (GWO) on PV system performance have been comparatively evaluated. For the DC-DC power conversion stage, a boost converter has been employed due to its ability to efficiently regulate output voltage and maintain system stability during dynamic operating conditions. The findings reveal that while classical algorithms offer low computational cost, they fall short in adapting to dynamic environmental conditions. In contrast, recent metaheuristic algorithms exhibit more stable and efficient performance, particularly under partial shading and rapidly changing weather conditions. Within this context, the proposed methods are expected to contribute significantly to enhancing energy efficiency in military applications such as mobile power generation and unmanned platforms.

Keywords: Maximum Power Point Tracker (MPPT), Meta-Heuristic Optimization Techniques, DC/DC Convertor, Perturb Observe (P&O),

Introduction

Electrical energy is an indispensable and ever-increasing energy requirement of today. Most of this energy is still supplied by fossil fuels. However, the limited reserves of fossil fuels and the negative effects of CO and CO_2 gases resulting from their consumption on nature and living things lead to environmental problems such as climate change and ozone depletion(Zaki Diab & Rezk, 2017). For these reasons, countries are turning to renewable energy sources in order to overcome the energy crisis and protect the environment. Among these sources, photovoltaic (PV)

technologies offer significant advantages thanks to their large installation area, low maintenance, silent operation, emission-free energy production and utilization of an unlimited resource such as the sun(Ishaque & Salam, 2013; Rezk & Dousoky, 2016).

PV systems stand out as a strategic energy solution not only in civilian areas but also in military applications. Due to their silent operation, no fuel requirements and low visibility profile, mobile energy systems provide reliable and sustainable power for military platforms such as forward bases, unmanned ground and air vehicles. However, the efficiency of these systems depends on environmental factors such as the amount of incoming solar radiation, temperature, angle of incidence and load resistance. In cases such as partial shading, PV arrays can generate multiple local maximum power points (LMPPs) instead of a single maximum power point (MPP)(Bendib et al., 2015). In this case, the resulting power remains below the global maximum power point (GMPP) (Gosumbonggot et al., 2018).

Due to the nonlinear characteristic of PV cells, the output power-voltage curve (P-V curve) is variable. Therefore, Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are used in PV systems. Traditional MPPT methods include Hill Climbing (Xiao & Dunford, 2004), Perturb and Observe (P&O)(Femia et al., 2009; Petrone et al., 2011), Incremental Conductance (INC) (F. Liu et al., 2008; Mei et al., 2011; Safari & Mekhilef, 2011)and Ripple Correction [16], which have low computational cost. However, these algorithms fail to provide the desired performance when multiple local maxima occur or when environmental conditions change rapidly(Thakkar et al., 2010).

To overcome this problem, many researchers have turned to metaheuristic optimization algorithms in recent years. These algorithms aim to find the global maximum power point of the PV system more efficiently(Chen et al., 2014). In this context, modern algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO)(Chao et al., 2015; Ishaque & Salam, 2013), Bat Algorithm (BA), Artificial Bee Colony (ABC), Hybrid Genetic Algorithms (Hybrid GA), Reptile Search Algorithm (RSA) and Gray Wolf Optimization (GWO)(Mohanty et al., 2016)have been applied in PV systems. Especially by combining PSO with Lagrange Interpolation (LI), the convergence time of the algorithm is reduced, and the solution efficiency is improved(Koad et al., 2017). Similarly, studies using hybrid models with PSO, Ant Colony (AC), Whale Optimization and Differential Evolution algorithms have also achieved high success(Y.-H. Liu et al., 2012).

In this study, the effects of modern metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Bat Algorithm (BA), Artificial Bee Colony (ABC), Hybrid Genetic Algorithms (Hybrid GA), Reptile Search Algorithm (RSA), and the Grey Wolf Optimizer (GWO) on PV system performance have been comparatively evaluated. On the power electronics side, a boost type DC-DC converter is used because of its ability to provide system stability under dynamic operating conditions.

As a result of, MPPT is of great importance for the sustainability of energy production in PV systems. Traditional and modern versions of methods such as PSO, P&O, Ant Colony (AC), Artificial Neural Networks (ANN), Fuzzy Logic Controllers (FLC), Hill Climbing, Differential Evolution, Firefly and Grey Wolf Optimization make significant contributions to ensure continuity, especially in challenging operational conditions such as military mobile power generation, forward deployed power systems and unmanned platforms.

Materials and Methods

The structure of the photovoltaic system and the components used are explained. According to Figure 1, the system consists of a PV module, a DC-DC converter and an MPPT algorithm.

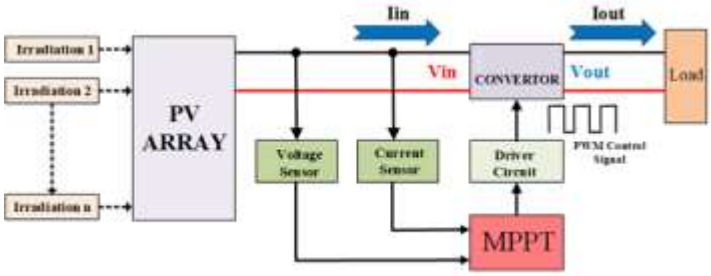


Figure 13. The Block Diagram of the PV System

Photovoltaic Module

PV cells contain p-n junctions made of semiconductor materials. This structure exhibits diode behavior and is represented electrically by the single diode model. This model, shown in Figure 2, consists of a light-excited current source Iph, a series resistor R_s, a shunt resistor R_{sh} and a diode. The output current of the PV cell is defined by the following equation:

$$I = I_{ph} - \left\{exp\left(\frac{V + IR_S}{\alpha KTNn}\right) - 1\right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

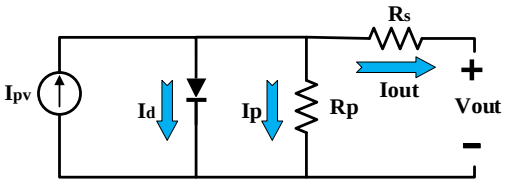


Figure 14. Single diode equivalent circuit of PV cell

In this equation: I - PV output current, V - terminal voltage I_{ph} - photon current, I_s- diode saturation current, R_s -series resistance, R_{sh} - loop resistance and α - ideality factor, K - Boltzman constant, T - temperature in kelvin units and N_n- number of cells, respectively. Using the diode model presented, the PV characteristic curves for the 210 W PV panel sample used in the analyses in this study are presented in Figure 3 under standard test conditions at 1000 W/m^2 solar radiation and 25 cantigrad degree temperature.

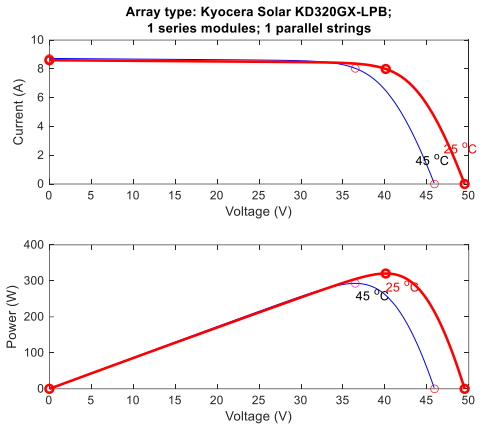


Figure 15. under standard test conditions at 1000 W/m2 solar radiation and 25 cantigrad degree temperature I-V and P-V chararacteristics of PV.

Table 8. Characteristics table of the Kyocera Solar KD320GX-LPB photovoltaic panel

Parameter	Value	Unit
Maximum Power (Pmax)	320.399	W
Number of Cells per Module (Ncell)	80	-
Open-Circuit Voltage (Voc)	49.5	V
Short-Circuit Current (Isc)	8.6	A
Voltage at Maximum Power Point (Vmp)	40.1	V
Current at Maximum Power Point (Imp)	7.99	A
Temperature Coefficient of Voc	-0.3624	%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.071	%/°C
Light-Generated Current (IL)	8.6153	A
Diode Saturation Current (I0)	3.2022e-10	A
Diode Ideality Factor	1.0039	-
Shunt Resistance (Rsh)	233.3987	Ohm
Series Resistance (Rs)	0.41435	Ohm

Modern Meta-heuristic Optimization Algorithms for MPPT: PSO, BA, ABC, Hybrid GA, RSA and GWO Approaches

The efficiency of solar energy systems is directly related to maximizing the electrical power generated by photovoltaic (PV) panels despite dynamic environmental conditions. The operating characteristics of PV systems have a non-linear structure and due to this structure, the systems

cannot always realize maximum power generation. For this reason, Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques are used in PV systems to continuously steer the operating point of the system to the optimum value.

Classical MPPT algorithms (Perturb & Observe, Incremental Conductance, etc.) are advantageous in terms of low computational cost and simplicity. However, in cases such as partial shadowing and sudden irradiance changes, the efficiency of these algorithms is severely degraded and the system can get stuck in local maxima and move away from the global maximum. In this context, meta-heuristic optimization algorithms have emerged as powerful alternatives for MPPT in recent years.

Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO is an optimization algorithm inspired by the foraging behavior of flocks of birds. In MPPT applications, particles move along the power-voltage (P-V) curve and update their positions by evaluating their own best point (pBest) and the global best point (gBest). The advantage of PSO is that it is highly successful in achieving GMPP due to its fast convergence. The algorithm is also easy to adapt. However, the computational burden can increase when working with a large number of particles [21, 23, 26, 29].

Bat Algorithm (BA)

The bat algorithm is a technique based on the echolocation behavior of micro-bats and tries to reach the optimum point with continuously updated frequency, speed and position values. When used for MPPT in PV systems, it has the potential to respond quickly thanks to both exploration and exploitation capabilities. BA can give very good results with a low number of iterations, but it has a high sensitivity to initial parameters.

Artificial Bee Colony (ABC)

The artificial bee colony algorithm mimics the foraging strategy of honeybees. In MPPT applications, bees explore different solution points on solar panel characteristics. Worker bees, employed bees, scout bees and onlooker bees work together to find the best energy point. The ABC algorithm performs effectively, especially in scenarios with multiple local maxima. However, the speed of convergence can be slower compared to algorithms such as PSO.

Hybrid Genetic Algorithms (Hybrid GA)

Genetic algorithms (GA) are powerful optimization techniques that seek solutions inspired by natural evolutionary processes. The mechanisms of classical GA such as crossover, mutation and selection, combined with other algorithms to create hybrid structures have become widespread in the field of MPPT. For example, the combination of GA with Differential Evolution or PSO provides faster convergence and more stable tracking. Hybrid GA structures increase the success of the PV system in achieving GMPP, especially in multivariable environmental conditions [28, 29].

Reptile Search Algorithm (RSA)

RSA is a next generation meta-heuristic algorithm based on the hunting behavior of reptiles. Developed for MPPT applications, RSA can systematically scan the problem space and evaluate both local and global optimum points. The algorithm can achieve a dynamic balance between exploration and exploitation, enabling rapid adaptation even in the face of sudden environmental changes. In the literature, it has been reported that the convergence time of RSA can be shorter than PSO and GA and that it is highly efficient under partial shadowing conditions.

Grey Wolf Optimizer (GWO)

The GWO algorithm is based on the leadership hierarchy of wolves (alpha, beta, delta, omega) and their containment-prey behavior. In MPPT applications, this structure allows for strategic screening of potential solution points on the PV characteristic curve. The main advantage of GWO is its simple structure and strong search capability, which can offer high success in different conditions. Especially in low irradiance scenarios, GWO is able to stably track the GMPP even when conventional algorithms fail.

Findings and Discussion

The circuit in the figure 4 shows a DC-DC converter structure in which a photovoltaic (PV) system works in conjunction with a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. Three PV modules operate under different temperature and irradiance conditions, and the output voltage obtained by connecting these modules in series is sent to the MPPT algorithm. The algorithm determines the maximum power point and generates the appropriate pulse width modulation (PWM) signal, which is used to drive the DC-DC converter. The output of the converter is used to maintain a constant DC voltage across the load. The system provides real-time control by monitoring parameters such as voltage (Vpv), current (Ipv), power and duty ratio. This structure represents a typical MPPT-based power electronics application used to improve the efficiency of PV systems.

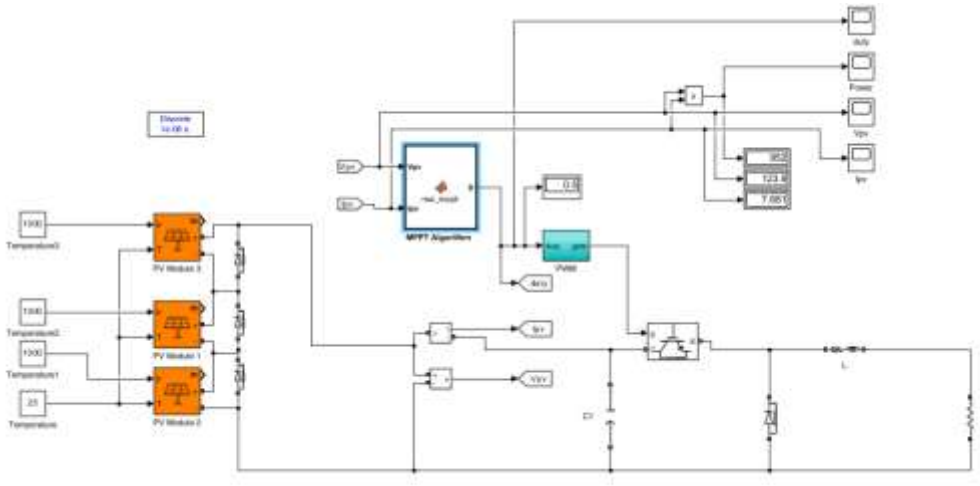


Figure 16. MPPT design using optimization technique for PV system.

The effects of modern metaheuristic algorithms such as Particle Swarm Optimization (PSO), Bat Algorithm (BA), Artificial Bee Colony (ABC), Hybrid Genetic Algorithms (Hybrid GA), Reptile Search Algorithm (RSA), and the Grey Wolf Optimizer (GWO) on PV system performance have been comparatively evaluated and simulation results presented as bellow;

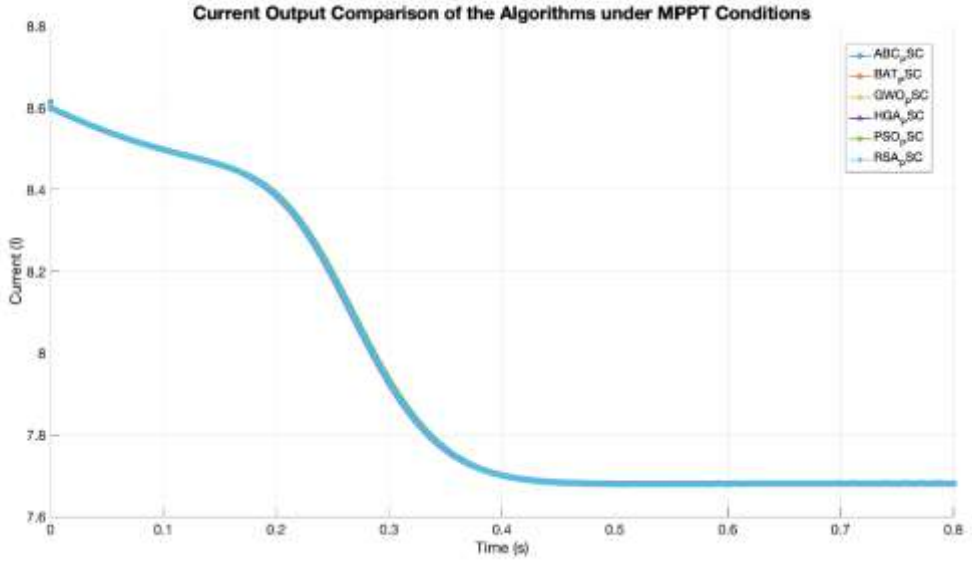


Figure 17. Current Output Comparison of the Algorithms under MPPT Conditions

This graph shows the time-varying output current response of various MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms. The algorithms compared include ABC (Artificial Bee Colony), BAT (Bat Algorithm), GWO (Gray Wolf Optimization), HGA (Hybrid Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) and RSA (Red Squirrel Algorithm). Each curve represents how the current (I) changes from the initial state to the steady state under standard test conditions. Initially, all algorithms start with a current of about 8.6 A and show a transient decrease, reaching equilibrium at about 7.68 A. The graph reveals the convergence behavior and stability of each algorithm in effectively tracking the maximum power point.

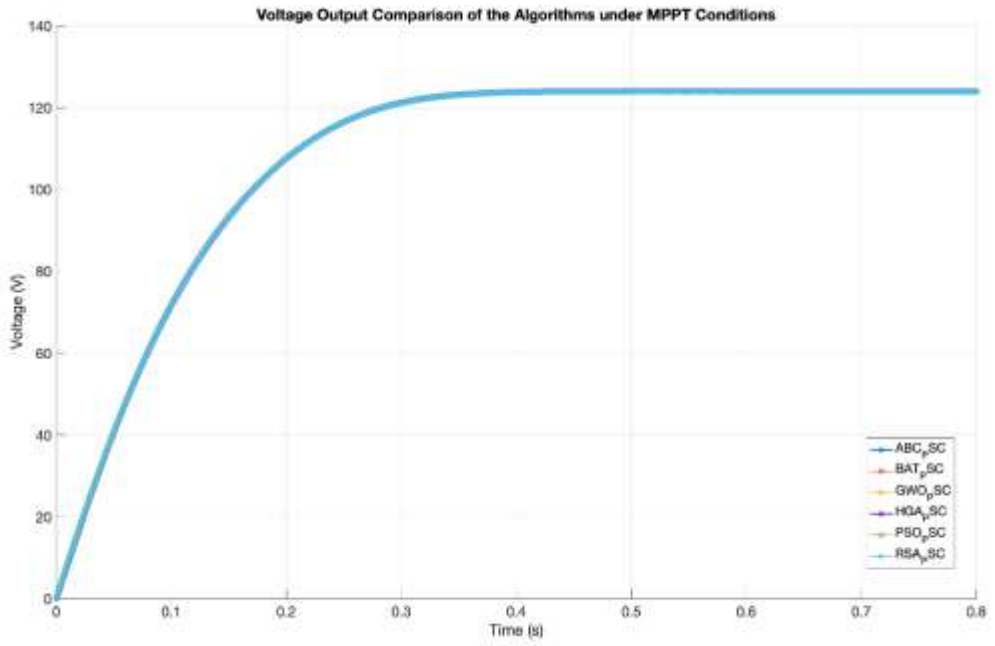


Figure 18. Voltage Output Comparison of the Algorithms under MPPT Conditions

This figure presents the voltage output behavior of different MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms over time. The compared algorithms include ABC (Artificial Bee Colony), BAT (Bat Algorithm), GWO (Grey Wolf Optimizer), HGA (Hybrid Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization), and RSA (Red Squirrel Algorithm). Initially starting from 0 V, all algorithms exhibit a rapid rise in voltage, reaching a steady-state value of approximately 123.9 V by around 0.4 seconds. The graph demonstrates the dynamic response and convergence capabilities of each algorithm in achieving the optimal operating voltage under MPPT control, highlighting their efficiency and performance consistency.

Figure7 compares the power output performance of several MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms over time. The algorithms included are ABC (Artificial Bee Colony), BAT (Bat Algorithm), GWO (Grey Wolf Optimizer), HGA (Hybrid Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization), and RSA (Red Squirrel Algorithm). Initially, the power output rapidly increases from 0 W, reaching a peak of around 960 W at approximately 0.25 seconds. All algorithms exhibit similar convergence behavior, quickly stabilizing near the maximum power point. This plot effectively illustrates each algorithm's ability to track the optimal power output, demonstrating high efficiency and fast dynamic response under MPPT control.

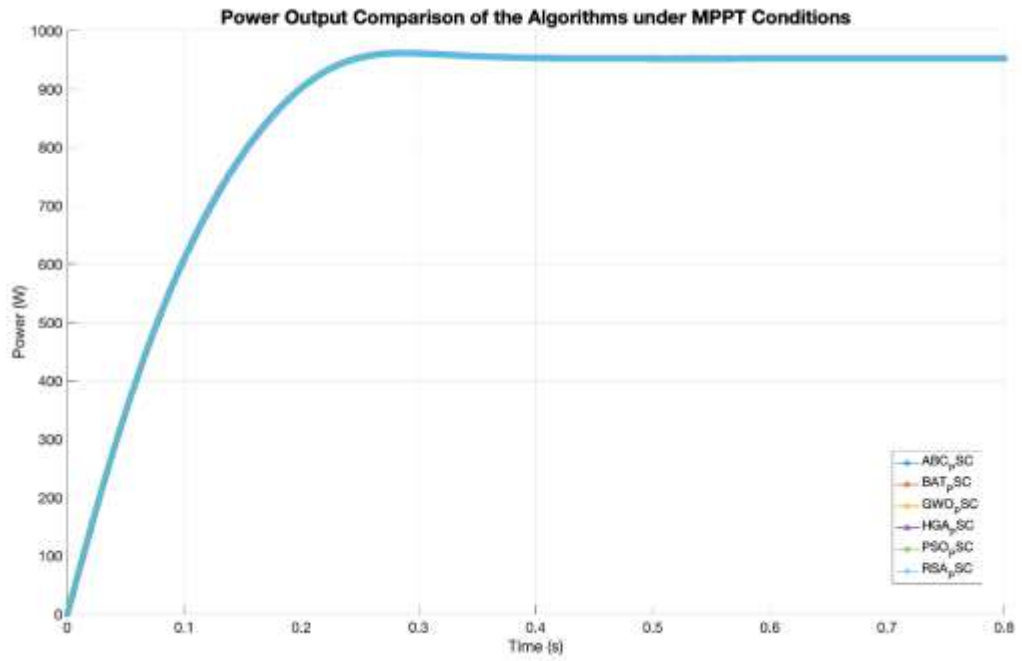


Figure 19. Power Output Comparison of the Algorithms under MPPT Conditions

This section describes the key metrics used to quantitatively evaluate the performance of MPPT (Maximum Power Point Tracking) algorithms. The capacity of each algorithm to reach the maximum power point and how long it can operate stably at this point are analyzed with metrics such as instantaneous maximum power, average power, MPPT efficiency and settling time. These metrics provide an important basis for comparative evaluation of algorithms to determine which method offers faster, more efficient and stable tracking performance. Each performance metric is described in detail below.

a. Actual Maximum Power (Pmax)

The actual maximum power is defined as the highest instantaneous power value reached during the simulation of each algorithm:

$$P_{max}^{(i)} = \max\left(P^{(i)}(t)\right) \tag{2}$$

Here $P^{(i)}(t)$, represents the power curve of the i-th algorithm.

b. Average Power (Pavg)

The average power corresponds to the mean power delivered by the algorithm throughout the simulation period:

$$P_{avg}^{(i)} = \frac{1}{T}\int_0^T P^{(i)}(t) \cdot dt \approx mean(P^{(i)}) \tag{3}$$

Here T, denotes the total simulation time, and the expression represents the average of the collected power values.

c. MPPT Efficiency (η)

MPPT efficiency evaluates how closely the average power output of an algorithm approaches the highest global maximum power point achieved across all algorithms. It is expressed as a percentage:

$$\eta^i = \frac{P_{avg}^{(i)}}{P_{max}^{global}} \times 100 \quad (4)$$

Burada $P_{max}^{global} = max_i(P_{max}^{(i)})$ olarak tanımlanır.

d. Settling Time

Settling time indicates how quickly the algorithm stabilizes around the maximum power point after the start of tracking. It is defined as the earliest time at which the power remains within a specified tolerance band (e.g., ±5%) of the reference value:

$$t_{setting}^{(i)} = \min\{t \mid |P(t) - P_{ref}| < \varepsilon \, \forall t > t\} \quad (5)$$

Here ε, represents the allowable tolerance band, and P_{ref} is typically set to the maximum expected power value.

Table 9. Performance Metrics of MPPT Algorithms: Maximum Power, Average Power, and Efficiency

Algorithm	P_{max}	P_{avg}	Efficiency Percent
BAT	961.29	852.88	88.723
ABC	961.29	852.77	88.711
HGA	961.29	852.69	88.703
RSA	961.29	852.69	88.703
GWO	961.29	852.54	88.687
PSO	961.29	852.24	88.656

The data given in Table 2 reveals the comparative performance of different MPPT algorithms in terms of maximum power, average power and efficiency. All algorithms were able to reach the same maximum power value (961.29 W) throughout the simulation period, indicating that the algorithms were able to accurately detect the maximum power point. However, the average power values and the corresponding efficiency ratios show small differences between the algorithms.

The BAT algorithm achieves the highest average power and efficiency value with 88.723%, followed by ABC, HGA and RSA algorithms with very close values. GWO and PSO algorithms have slightly lower average power and efficiency values than the others. These results show that the BAT algorithm provides both fast and stable tracking, thus it can be one of the most effective methods for MPPT applications.

Conclusion

This study comparatively evaluates the performance of modern meta-heuristic algorithms PSO, BAT, ABC, Hybrid GA, RSA and GWO under dynamic conditions for Maximum Power Point Tracking (MPPT) control in photovoltaic (PV) systems. As a result of the simulation analysis, all algorithms successfully reached the global maximum power point (GMPP) and showed that they were able to accurately track the optimum operating point. However, small differences were observed in the average power and efficiency values; the highest performance was achieved by the BAT algorithm, followed by ABC, HGA and RSA algorithms with very close results.

The MPPT system integrated with a boost-type DC-DC converter provided effective voltage regulation under varying irradiance and temperature conditions and successfully maintained system stability. The graphical results of current, voltage and power outputs clearly demonstrate that modern meta-heuristic algorithms offer faster convergence, shorter settling time and higher stability compared to conventional methods.

The findings show that advanced optimization-based MPPT strategies can significantly improve power generation efficiency in PV systems. Especially in mobile and mission-critical applications, such as military platforms, these algorithms are considered to make a great contribution in terms of reliability, autonomy and rapid adaptation to environmental changes. In future studies, these algorithms

References

Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 637–648. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.009

Chao, K. H., Lin, Y. S., & Lai, U. D. (2015). Improved particle swarm optimization for maximum power point tracking in photovoltaic module arrays. *Applied Energy*, *158*, 609–618. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.047

Chen, K., Tian, S., Cheng, Y., & Bai, L. (2014). An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *5*(3), 978–985. https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2315653

Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2009). A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *56*(11), 4473–4482. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2029589

Gosumbonggot, J., Nguyen, D. D., & Fujita, G. (2018). Partial Shading and Global Maximum Power Point Detections Enhancing MPPT for Photovoltaic Systems Operated in Shading Condition. *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, *1*, 1–6. https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541880

Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *60*(8), 3195–3206. https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2200223

Koad, R. B. A., Zobaa, A. F., & El-Shahat, A. (2017). A Novel MPPT Algorithm Based on Particle Swarm Optimization for Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *8*(2), 468–476. https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2606421

Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *55*(7), 2622–2628. https://doi.org/10.1109/TIE.2008.920550

Liu, Y.-H., Huang, S.-C., Huang, J.-W., & Liang, W.-C. (2012). A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, *27*(4), 1027–1035. https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2219533

Mei, Q., Shan, M., Liu, L., & Guerrero, J. M. (2011). A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(6), 2427–2434. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2064275

Mohanty, S., Subudhi, B., & Ray, P. K. (2016). A new MPPT design using grey Wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *7*(1), 181–188. https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2482120

Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2011). A Multivariable Perturb-and-Observe Maximum Power Point Tracking Technique Applied to a Single-Stage Photovoltaic Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(1), 76–84. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2044734

Rezk, H., & Dousoky, G. M. (2016). Technical and economic analysis of different configurations of stand-alone hybrid renewable power systems – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 941–953. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.023

Safari, A., & Mekhilef, S. (2011). Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(4), 1154–1161. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048834

Thakkar, N., Cormode, D., Lonij, V. P. A., Pulver, S., & Cronin, A. D. (2010). A simple non-linear model for the effect of partial shade on PV systems. *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2321–2326. https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614450

Xiao, W., & Dunford, W. G. (2004). A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, *3*, 1957–1963. https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355417

Zaki Diab, A. A., & Rezk, H. (2017). Global MPPT based on flower pollination and differential evolution algorithms to mitigate partial shading in building integrated PV system. *Solar Energy*, *157*, 171–186. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.024

NEXT-GENERATION LANDMINE DETECTION SYSTEMS: A MINI REVIEW OF EMERGING TECHNOLOGIES

Ataberk KÖŞGER
Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul -Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0009-0002-3642-609X
Arda GÜNEŞ
Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul -Türkiye
ORCID: 0009-0003-5133-4107
Enes ALTINDİREK
Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul -Türkiye
ORCID: 0009-0003-5445-8623
İsmail Buğra KURU
Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul -Türkiye
ORCID: 0009-0007-4012-0970
Muhammed Faruk ŞAHİN
Research Assistant, Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul - Türkiye (Corresponding Author)
ORCID: 0009-0007-8901-6410

Abstract

In recent years, landmines and Unexploded Ordnance (UXO) have significantly constrained the mobility, reconnaissance, and operational activities of security forces, particularly in asymmetric warfare and low-intensity conflict zones. These threats pose a persistent danger to personnel safety and result in losses that extend beyond casualties, creating substantial time and resource demands during operational planning. Consequently, such threats hinder the movement and deployment processes of military units, negatively affecting operational secrecy. Effectively eliminating these threats underscores the growing importance of technological solutions aimed at the accurate and safe detection of landmines. Traditional mine detection techniques such as metal detectors, geophysical sensors, trained dogs, and various other methods have been widely used; however, each of these methods presents specific limitations. For instance, metal detectors tend to produce high false-positive rates due to environmental metal density, while trained dogs experience reduced efficiency during prolonged operations. To overcome these limitations, advanced mine detection systems offer more sensitive and reliable detection capabilities, addressing the shortcomings of conventional methods and enabling more effective solutions. These advanced systems integrate high-sensitivity sensors, satellite imaging, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), and artificial intelligence-supported analyses to enhance detection accuracy. This mini review aims to assess the current status and future potential of advanced mine detection methods found in recent literature. By minimizing false-positive rates, advanced detection systems enable faster and safer mine clearance operations, thereby increasing operational efficiency. Nonetheless, challenges such as sensitivity to environmental noise in real-time applications, complex data processing requirements, and low detection thresholds remain

relevant issues. This study provides a detailed account of how advanced mine detection methods contribute to addressing existing problems in their potential areas of application.

Keywords: Landmine detection, Mine clearance operations, Multi-sensor data fusion, Artificial intelligence.

1. GİRİŞ

Kara mayınları, genellikle toprağın altına yerleştirilen ve üzerine uygulanan basınç, uzaktan kumanda ve çeşitli tetikleme mekanizmaları aracılığıyla aktive olan patlayıcı düzenekler olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu patlayıcılar, stratejik bölgelerde ve güvenli alanlarda askeri hareketliliği engellemek veya zayiat vermek üzere tasarlanmaktadır [2], [3]. Bu sebeple, sahadaki personel üzerinde doğrudan tehdit oluşturan unsurlar arasında yer almaktadır [4]. Kara mayınları, askeri operasyonların başarısını kritik şekilde tehdit etmesi sebebiyle etkisiz hale getirilmesi kritik önem taşımaktadır [5], [6]. Ancak, bu süreç ciddi riskler barındırmakta ve uzmanlık bilgisi gerektirmektedir [7]. Bu durum, sadece personel için değil genel askeri strateji ve hareketlilik açısından da önemli kısıtlamalar doğurmaktadır. Özellikle asimetrik harp ve düşük yoğunluklu çatışma bölgelerinde, mayınlar güvenlik güçlerinin intikal, keşif ve operasyonel faaliyetlerini büyük ölçüde sınırlandırmaktadır [8]. Bu durum, birliklerin hızlı ve güvenli bir şekilde hareket etmesini engelleyerek stratejik esnekliklerini azaltmaktadır [9]. Böylece, mayınlar yalnızca personel kaybına neden olmamakla birlikte aynı zamanda planlama ve tespit sürecinde yaşanan zorluklar nedeniyle operasyonların başarısını olumsuz etkilemektedir [10]. Ayrıca, birliklerin mayın tespiti için harcadığı zaman ve enerji, operasyonların gizliliğini riske atmaktadır [11].

Tüm bu nedenlerden ötürü, mayın tespiti askeri operasyonların güvenliği ve etkinliği açısından kritik bir öneme sahip olmaktadır [12]. Geleneksel mayın tespitinde metal dedektörleri, jeofiziksel sensörler, eğitimli köpekler ve çeşitli diğer teknikler kullanılmakta olup son yıllarda yaygınlığını daha da artmaktadır [13]. Ancak bu yöntemler, geniş arazilerde uygulandığında zaman alıcı olmaktadır [14]. Termal görüntüleme sistemleri başta olmak üzere teknolojik yenilikler ise yer altındaki mayınları ısı farklarına dayanarak tespit etme imkanı sunmakla birlikte çevresel koşullar nedeniyle verimli olmamaktadır [15]. Otonom kara araçları ve insansız hava araçları ise insan riskini azaltmak ve tespit hızını artırmak açısından önemli avantajlar sunmaktadır [16]. Ancak zorlu arazi yapısı, mayınların kamuflajı ve çeşitli etkenler sebebiyle bu sistemlerin de etkinliğini sınırlandırabilmektedir [17]. Bu nedenle, mayın tespiti teknolojilerinin sürekli olarak geliştirilmesi ve askeri sistemlerle entegre edilmesi, operasyonel üstünlüğün sağlanması açısından temel bir gereklilik olmaktadır [18].

1.1. MOTİVASYON VE KATKI

Kara mayını tespit sistemlerini kritik sınırlamaları sebebiyle geleneksel sistemler bu ihtiyaçlara karşılık verememektedir. Bu mini derleme çalışması, mevcut literatürü sistematik olarak sentezlemeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Böylece, tespit sistemlerinin zorlukları ve sınırlamaları belirlenerek avantajları ve dezavantajları kapsamlı bir şekilde analiz edilecektir. Bu analizler ışığında, araştırmacıların mayın tespit sistemlerine genel bir bakış açısıyla daha etkili çözümler geliştirmelerini sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışmamızın benzersiz katkıları ise aşağıdaki gibi özetlenebilir:

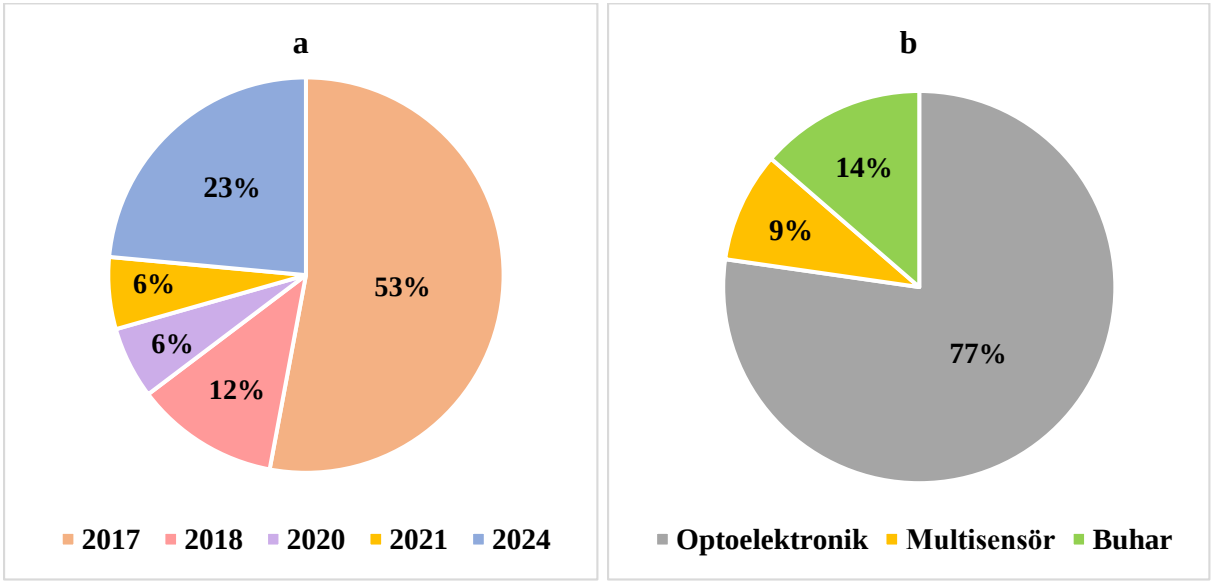
- Kara mayını tespitine yönelik mevcut yöntemler için kullanılan sensör teknolojileri, algoritmalar ve platformlar açısından sınıflandırılarak kapsamlı bir çerçevede sunulmuştur.
- Literatürde sıkça kullanılan sistemlerin performans, maliyet, uygulanabilirlik ve çevresel faktörlere duyarlılık gibi açılardan karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.
- Asimetrik çatışma ortamlarında karşılaşılan pratik sınırlamalar, mevcut teknolojilerin etkinliği bağlamında değerlendirilmiştir.
- Gelecekteki araştırmalar için ihtiyaç duyulan teknolojik gelişim alanları ve potansiyel iyileştirme noktaları tartışılmıştır.

2. MAYIN TESPİT SİSTEMLERİ

Bu kısımda, derlenen çalışmalara ait istatistiksel bilgiler bahsedildikten sonra optoelektronik sistemler, çoklu sensör tabanlı yaklaşımlar ve buhar temelli algılama teknolojileri detaylı şekilde incelenerek karşılaştırmalı bir çerçevede değerlendirilmektedir.

2.1. DERLENEN ÇALIŞMALARA AİT SAYISAL VERİLER

Bu kısımda, mayın tespit sistemleri için derlenen çalışmalara ilişkin istatistiksel bilgileri sunulmakta ve Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu çalışma, mayın tespitinde kullanılan farklı yöntemlerin kapsamlı bir analizini sunmak amacıyla sistematik bir inceleme metodolojisi benimsemektedir. Değerlendirmeye alınan çalışmalar kriter olarak mayın tespitine doğrudan uygulanabilirliğinin bulunması ve prestijli akademik dergilerde veya konferanslarda yayımlanmış olmasını içermektedir. Bu bağlamda, incelenen 17 makalenin %53'ü 2017 yılı ve öncesine, %23'ü ise 2024 yılına ait olmaktadır. Optoelektronik tabanlı yöntemler %77 oranla en çok tercih edilen yaklaşım olarak öne çıkarken multisensör sistemler %9, buhar temelli algılama teknikleri ise %14 oranında yer almaktadır. Bu dağılım, mayın tespitinde optoelektronik yöntemlerin halen baskın olduğunu ancak yeni nesil çoklu sensör ve kimyasal temelli sistemlerin de giderek önem kazandığını göstermektedir.



Şekil 1. a) Çalışmaların yıllara göre dağılımı, b) Derlenen çalışmaların dağılımı

2.2. OPTOELEKTRONİK

Optoelektronik teknolojiler, kara mayınlarının tespitinde, patlayıcı maddelerin çevreye yaydığı ışık dalgalarının izlenmesine dayanmaktadır. Patlayıcıların toprakla etkileşimi sonucu meydana gelen optik sinyaller, çevresel koşullara bağlı olarak yüzeye yansımaktadır. Bu sinyallerin tespitinde kullanılan optoelektronik sensörlerin yüksek çözünürlük ve hassasiyetle çalışması, güvenli ve etkili mayın tespiti için kritik öneme sahip olmaktadır. Gelişmiş optoelektronik sistemler, düşük yoğunluktaki sinyalleri algılayarak yer altındaki mayınların uzaktan tespit edilmesini sağlamaktadır. Bu teknolojiler, insan faktörüne dayalı mayın temizleme süreçlerinin risklerini azaltmayı ve operasyonel verimliliği artırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada incelenen optoelektronik tabanlı mayın tespit sistemi araştırmaları Tablo 1'de özetlenmektedir.

Son yıllarda, geleneksel tespit sistemlerinin büyük ve sabit yapıları, sahada kullanımını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Bu sorunu iyileştirmek için, taşınabilir optik sensörlerin minyatürleştirilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım önerilmektedir [19]. Önerilen yüksek verimli LED'ler ve kuantum kaskad lazerler, dalga boyu seçici büyük bileşenlerin sistemden çıkarılması ve düşük enerji tüketimli bileşenlerin kullanımı temel alınmaktadır. Böylece, gerçek zamanlı analizlerin düşük maliyetle sahada gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Ancak, sınırlı enerji kaynakları uzun süreli kullanımlarda performans kaybına ve masaüstü sistemlere kıyasla sınırlı çözünürlüğe yol açmaktadır. Bir başka çalışmada ise fotodedektörlerin geleneksel kullanımlarındaki düşük hassasiyet ve dar spektral algılama aralığı, ölçüm doğruluğunu sınırlayan önemli bir sorundur. Bu bağlamda, nanoyapılı malzemelerin kullanımı, Ultraviyole (UV)'den infrared (IR) bölgesine kadar fotodedektörlerin performansını iyileştirmek için önerilmektedir [20]. Metal oksit yarı iletkenler, grafen bazlı nanokompozitler ve kuantum noktaları olmak üzere çeşitli gelişmiş malzemeler sensörlerin spektral yanıtını genişleterek taşınabilir biyosensörlerden mayın temizleme operasyonlarına kadar çeşitli uygulamalarda verimli bir performans sunmaktadır. Ancak, çevresel koşulların etkisi sorun oluşturması sebebiyle dezavantajlı olmaktadır.

Kara mayını tespitinde diğer bir problem ise düşük hassiyet bulunması sebebiyle optik sensör tabanlı teknikler ön plana çıkmaktadır. Lazerle uyarılan floresans, Raman spektroskopisi, fotolüminesans, yüzey artırımlı Raman saçılımı (SERS) ve lazerle uyarılmış bozunma spektroskopisi (LIBS) yöntemleri, patlayıcıların özgül spektral tepkilerini analiz ederek yüksek hassasiyet ve düşük yanlış pozitif oranıyla gerçek zamanlı, taşınabilir tespit sistemleri geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [21], [22]. Özellikle SERS, metalik nano yüzeyler üzerinde Raman sinyalini 10^2–10^9 kat artırarak düşük konsantrasyonlarda tespiti mümkün kılmaktadır. Ancak çevresel örneklerin karmaşık matris yapısı ve dış etmenler, uygulamada performans ve doğruluk açısından zorluklar oluşturmakla beraber yüksek maliyet ve düşük özgüllük sorunları bulunmaktadır. Bu nedenle, sahada hızlı, hassas ve maliyet etkin analiz tekniklerinin geliştirilmesi patlayıcı tespiti için kritik öneme sahip olmaktadır. Patlayıcı tespitinde hassasiyetin artırılması ve güvenlik açıklarının azaltılması amacıyla, CEAS (Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy) yöntemi önerilmektedir [23]. Önerilen yöntem, gelişmiş lazer teknolojileri sayesinde düşük konsantrasyonlu patlayıcı buharları yüksek hassasiyetle algılanabilmekte ve böylece taşınabilir sistemlerle sahadaki müdahale süresini iyileştirmektedir. Ancak, sistemler

genellikle belirli patlayıcı türlerine odaklanmakta, çevresel koşullara duyarlılık ve yüksek maliyet dezavantajları bulunmaktadır. Mayınları tespit etmede bir başka sorun olan uzak mesafeden patlayıcı tespitindeki zorlukları aşmak için IR ve Raman spektroskopisi yöntemleri önerilmektedir [24]. Yüksek hassasiyetli Fourier Dönüşümlü IR (FTIR) ve Raman spektroskopisi, lazer tabanlı sistemlerle entegrasyon ve SERS ile analizler hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, numune hazırlama gerekmeksizin 20 metre mesafeden patlayıcıların Raman-LIBS spektrumları eşzamanlı olarak tespit edilebilmektedir. Öte yandan, sistemlerin çevresel faktörlere olan hassasiyeti ve maliyetleri uygulama alanlarını sınırlamaktadır. Bu sınırlamaları iyileştirmek için Deep-UV yöntemi, Raman spektroskopisi ile floresans yöntemlerinin birleşimi, patlayıcı izlerinin uzak mesafeden hassas ve güvenilir biçimde tespiti için umut vadeden bir yaklaşım olmaktadır [25]. Bu optik algılama yöntemi, taşınabilir sistemlerde düşük yoğunluklu patlayıcı izlerinin tespitinde yüksek doğruluk ve yanlış pozitif sonuçların azaltılmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, düşük güçlü lazerlerin sınırlamaları ve geniş alan taramalarında ek sistem ihtiyaçları, uygulamadaki zorlukları beraberinde getirmektedir. Kara mayınlarının uzun yıllar aktif kalması ve mevcut tespit yöntemlerinin yetersiz hassasiyeti, sahada önemli güvenlik riskleri doğurmaktadır. Bu çalışma, hiperspektral görüntüleme yöntemi ile veri işleme algoritmalarını geliştirerek mayınların temassız ve uzaktan algılanmasını hedeflemektedir [26]. Uygulamalarda, tespit oranları %33 ile %100 arasında değişmekte, yanlış alarm oranları ise 0.1 ile 0.52/m² arasında kalmaktadır. Ancak, yüksek hesaplama gücü ihtiyacı ve çevresel koşulların hassasiyete etkisi önemli sınırlamalardır.

Kara mayınların tespitinde bir başka zorluk ise plastik ve metal içermeyen mayınların tespiti olmaktadır. Bu sebeple, üç aşamalı hibrit hiperspektral görüntü işleme yöntemi, ön işleme, derin öğrenme tabanlı özellik çıkarımı ve konvolüsyonel sinir ağı (CNN) sınıflandırmasını birleştirerek bu sorunu iyileştirmektedir [27]. Önerilen model ile hem toplu hem de gerçek zamanlı analizlerde ortalama %87.5 doğruluk elde edilmektedir. Ancak, yüksek yanlış pozitif oranı, hesaplama maliyeti ve saha testlerinin sınırlı olması uygulamaları kısıtlamaktadır. Bu kısıtı iyileştirmek için hiperspektral görüntüleme ve makine öğrenmesi algoritmaları, farklı dalga boylarındaki verilerin işlenmesi yöntemi kullanılması önerilmektedir [28]. Önerilen sistem, geniş alanların hızlı ve insansız şekilde taranmasını sağlayarak güvenli mayın tespiti sunmaktadır. Ancak, yüksek hesaplama maliyeti, uzun veri işleme süreleri ve çevresel koşulların sinyal kalitesini olumsuz etkilemesi önemli zorluklardır. Bu sorunu iyileştirmek için stereoskopik hiperspektral kızılötesi (IR) uzaktan algılama yöntemi önerilmektedir [29]. Hiperspektral görüntü işleme ve termal anomali tespit sistemlerinin birleşimi, insansız hava araçları (İHA) ile geniş alanların hızlı taranmasına olanak sağlamaktadır. Plastik mayınların verimli bir doğrulukla tespiti mümkün olurken çevresel faktörler, yüksek maliyet ve veri işleme zorlukları uygulamaların önündeki başlıca engeller olmaya devam etmektedir. Bu sorunu iyileştirmek için YOLOv8 tabanlı nesne algılama modeli ve optik görüntüleme teknolojisi önerilmektedir [30]. RGB kamera ve LiDAR verileriyle eğitilen yapay zeka modeli, %98,4 doğruluk ve 2 FPS hızında PFM-1 ile PMA-2 tipi plastik mayınları tespit edebilmektedir. Bu sistem düşük donanım gereksinimiyle mobil cihazlarda çalışabilirken, yüksek yanlış pozitif oranları ve çevresel faktörlerin performans üzerindeki olumsuz etkileri halen çözüm bekleyen sorunlar olmaktadır.

Tablo 1.Optoelektronik Tabanlı Mayın Tespit Sistemlerinin Özeti

Ref.	Problem	Avantaj	Dezavantaj	Sayısal Sonuç
[19]	Taşınabilir olmaması	Düşük maliyet, taşınabilir	Yüksek enerji tüketimi	*
[20]	Nano yapılı malzemelerin zorlu entegrasyonu	Taşınabilir	Çevresel faktörler	*
[22]	Düşük hassasiyet	Yüksek hassasiyet, gerçek zamanlı tespit	Çevresel faktörler	*
[23]	Yüksek hata oranı ve güvenlik açıkları	Yüksek hassasiyet	Gerçek zamanlı uygulanabilirlik	*
[24]	Düşük doğruluk hassasiyeti	Hızlı analiz yapabilme. Yüksek hassasiyet	Çok hassas ve maliyetli sensörler gerekmektedir	20m Tespit mesafesi
[25]	Çevresel faktörler	Düşük yoğunlukta tespit	Saha koşullarına adaptasyon	*
[26]	Düşük doğruluk hassasiyeti	Uzaktan algılama imkânı. Hızlı ve hassas tespit	Algoritma optimizasyonu	Yanlış alarm oranı 0,1 ile 0,52/m²
[27]	Plastik mayın tespiti	Gerçek zamanlı analiz	Yanlış pozitif oranı, hesaplama maliyeti	%87,5 doğrulukta
[28]	Plastik mayın tespiti	Uzaktan algılama, hızlı	Yüksek yanlış alarm oranı	*
[29]	Tespit hızı	İHA entegrasyonu	Çevresel faktörler	*
[30]	Tespit hızı	Gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukta tespit	Algoritma optimizasyonu	%98,4 doğrulukla

2.3. MULTİSENSÖR

Multisensör sistemler, farklı algılama teknolojilerini entegre ederek gömülü patlayıcıların tespitinde doğruluk ve güvenilirliği artırmaktadır. Metal dedektörleri, GPR, hiperspektral görüntüleme, termal kameralar ve biyosensörlerin birlikte kullanımı sayesinde, özellikle metal içermeyen mayınların algılanmasında çevresel etmenlerden kaynaklanan hatalar azaltılmaktadır. Bu kapsamda mayınların savaş sonrası bölgelerde oluşturduğu risklere karşı geliştirilen bir

yaklaşımda, multispektral kamera ile polarize IR görüntüleme sistemleri birleştirilmiştir [31]. Yapay sinir ağları ve ART2 (Uyarlanabilir Rezonans Teorisi 2) ile işlenen veriler sonucunda sistemin doğruluk oranı %96'nın üzerine çıkarılmakta ve yanlış alarm oranı ise %0.023'e düşürülmektedir. Ancak, sensör kalibrasyonu, çevresel değişkenlere duyarlılık ve işlem süresi yönlerden bazı sınırlamalar taşımaktadır. Benzer şekilde geliştirilen bir drone tabanlı sistem, sahada gerçekleştirilen testlerde 25 mayından 21'ini (%84) ve geliştirilmiş sürümünde 24'ünü (%96) başarıyla tespit etmektedir [32]. Hafifliği, otonom çalışması ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlarına rağmen kısa uçuş süresi ve tüm patlayıcı türlerini algılayamama sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu çalışmada incelenen multisensör tabanlı mayın tespit sistemi araştırmaları Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2. Multisensör Tabanlı Mayın Tespit Sistemlerinin Özeti

Ref.	Problem	Avantaj	Dezavantaj	Sayısal Sonuç
[31]	Yüksek riskli, yanlış alarm.	Yüksek doğruluk, düşük yanlış oranı	Kalibrasyon gereksinimi	%96 başarı, %0.023 yanlış alarm
[32]	Riskli ve zahmetli	Hafif ve verimli	Sınırlı algılama yetisi	Başarı: %84→%96

2.4. BUHAR

Patlayıcı maddelerin zamanla çevreye saldığı uçucu organik bileşenlerin (VOC) izlenmesi, kara mayınlarının tespitinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. TNT ve DNT gibi maddelerin toprakla etkileşimi sonucu oluşan buharlar, yüzeye taşınarak çeşitli sensörlerle tespit edilebilmektedir. Buhar temelli tespitte başarı, düşük konsantrasyonlardaki buharları ayırt edebilen yüksek hassasiyetli ve seçici sensörlerin kullanılmasına bağlı olmaktadır.

Bu kapsamda geliştirilen bir yöntemde, mikrobiyal biyosensörlerin algılama eşikleri genom düzeyindeki genetik müdahalelerle iyileştirilmektedir [33]. XylE tabanlı sistemlere çift mutasyon uygulanarak DNT algılama hassasiyetinde 400 kata varan artış elde edilmektedir. Bu sistem, düşük yoğunluktaki buhar kalıntılarını tespit edebilme potansiyeline sahip olmaktadır. Ancak sahada test edilmemiş olması, genetik stabiliteye dair uzun vadeli belirsizlikler ve endüstriyel üretim zorlukları gibi sınırlılıkları barındırmaktadır. Bir diğer çalışmada, yüzey akustik dalga (SAW) destekli polimer kaplı sensörler ile TNT ve 2,4-DNT gibi bileşenlerin çok düşük düzeylerdeki buharları tespit edilmektedir [34]. Bu sensörlerle 2,4-DNT için 235 ppt, TNT için ise 5 ppb seviyelerine kadar algılama sağlanmaktadır. Bu durum, düşük konsantrasyonlu patlayıcı kalıntılarının saptanmasında yüksek başarı sunmaktadır. Ancak sistem, toprak türü, sıcaklık ve nem olmak üzere çeşitli çevresel faktörler karşısında sinyal kararlılığını korumakta zorluk yaşayabilmekte ve geniş ölçekli saha uygulamaları halen sınırlı düzeyde olmaktadır. Alternatif olarak başka bir sistemde, düşük buhar basıncına sahip patlayıcıların güvenli şekilde buharlaştırılması amacıyla sürekli ve puls akışlı buhar jeneratörleri önerilmektedir [35]. Önerilen sistemde, sıcaklık kontrollü yüzeylerden buharlaştırma ve taşıyıcı gaz ile seyreltme yöntemiyle 0.05 ppbv seviyesinde buhar üretimi sağlanmaktadır. Bu sistem, yüksek doğrulukta ve kontrollü

ortam şartlarında çalışabilmektedir. Ancak buhar akışının kararlılığı, sıcaklık bölgelerinin yönetimi ve ısıl kontrol gibi mühendislik açıdan karmaşık düzenlemeler gerektirmektedir. Bu çalışmada incelenen buhar tabanlı mayın tespit sistemi araştırmaları Tablo 3'te özetlenmektedir.

Tablo 3.Buhar Tabanlı Mayın Tespit Sistemlerinin Özeti

Ref.	Problem	Avantaj	Dezavantaj	Sayısal Sonuç
[33]	Düşük duyarlılık	Çift mutasyon, hassasiyet artışı	Karmaşık üretim süreci	400 kat hassasiyet
[34]	Düşük buhar basıncı, sınırlı algılama	Yüksek hassasiyet, düşük konsantrasyon	Sinyal kararsızlığı	5 ppb TNT, 235 ppt DNT
[35]	Kararsız buhar üretimi	Hassas buhar üretimi	Zor sıcaklık yönetimi, karmaşık sistem	0.05 ppbv hassasiyet

3. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür incelemesi, mayın tespitine yönelik mevcut teknolojik yaklaşımları sistematik bir biçimde ortaya koymaktadır. Geleneksel yöntemlerin taşınabilirlik, çevresel koşullara duyarlılık ve sınırlı algılama hassasiyeti gibi teknik sınırlılıklar barındırdığı görülmektedir. Bu sınırlılıkların aşılması amacıyla, literatürde optoelektronik sensörlerin daha kompakt biçimlerde tasarlanması, yüksek hassasiyetli fotodedektörlerin sistemlere entegre edilmesi ve Raman, SERS, LIBS ve çeşitli lazer tabanlı analiz tekniklerinin kullanımı önerilmektedir. İlgili yöntemlerin özellikle plastik mayınların tespitinde etkili sonuçlar sunmaktadır. Bununla birlikte, hiperspektral görüntüleme tekniklerinin yapay zekâ destekli algoritmalarla birleştirilmesi sayesinde sistem performansının önemli ölçüde iyileştiği görülmektedir. Ancak çevresel etmenlerin olumsuz etkileri, yüksek hesaplama gücü gereksinimi ve yanlış pozitif oranlarının fazlalığı olma üzere sınırlayıcı unsurların da mevcut olduğu gözlemlenmektedir. Bu bağlamda, farklı algılama teknolojilerinin birlikte kullanıldığı multisensör sistemlerin ön plana çıktığı görülmektedir. Bu sistemler, sensörlerin tamamlayıcı niteliklerinden yararlanarak tekil sistemlerde karşılaşılan teknik eksiklikleri dengeleyebilmekte ve genel tespit güvenilirliğini artırmaktadır. Mevcut literatürde, yüksek teknolojili mayın tespit sistemlerinin çoğunlukla dışa bağımlı şekilde geliştirildiği sıklıkla belirtilmektedir. Bu durum, yalnızca teknik yeterlilik açısından değil, aynı zamanda stratejik bağımsızlık bakımından da önemli kısıtlamalar ortaya koymaktadır. Bu nedenle, çevresel koşullara duyarlı, düşük enerji tüketimine sahip ve sahada uygulanabilir yapay zekâ destekli sistemlerin geliştirilmesi hem teknik yeterlilik sağlamakta hem de savunma alanında stratejik bağımsızlık açısından kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Gelecekte mayın tespit sistemlerinin daha yaygın, güvenilir ve yüksek verimli hale gelmesi için aşağıdaki araştırma yönleri kritik öneme sahiptir:

- **Plastik Mayın Tespiti İçin Yeni Algoritmalar:** Plastik mayınların tespiti için daha hassas ve özgün analiz yöntemlerinin araştırılması gerekmektedir.
- **Yerel Teknoloji Geliştirme ve Stratejik Bağımsızlık:** Yüksek teknolojili mayın tespit sistemlerinin yerli kaynaklarla geliştirilmesi, hem teknik yeterlilik hem de ulusal

güvenlik açısından kritik bir gereklilik olmaktadır.

• **Çevresel Koşullara Dayanıklılık:** Farklı iklim ve arazi koşullarında güvenilir performans gösterebilen sistemlerin tasarlanması, özellikle zorlu coğrafi bölgelerde etkinliği artıracaktır.

• **Enerji Verimliliği ve Taşınabilirlik:** Sahada uzun süreli kullanım için düşük enerji tüketimine sahip, kompakt ve dayanıklı sistemlerin geliştirilmesi, mayın tespit teknolojilerinin uygulanabilirliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

[1] R. Evans, L. Nelson, ve T. Temple, "Operational data for the risk management of victim operated explosive devices in humanitarian mine action: A Practitioner's perspective", *Heliyon*, c. 10, sy 3, Şub. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25311.

[2] A. Duttine ve E. Hottentot, "Landmines and explosive remnants of war: a health threat not to be ignored", *Bull. World Health Organ.*, c. 91, sy 3, ss. 160-160A, Mar. 2013, doi: 10.2471/BLT.13.118885.

[3] I. Baselt, A. Skejic, B. Zindovic, ve J. Bender, "Geologically-Driven Migration of Landmines and Explosive Remnants of War—A Feature Focusing on the Western Balkans", *Geosciences*, c. 13, sy 6, Art. sy 6, Haz. 2023, doi: 10.3390/geosciences13060178.

[4] R. D. Newman ve M. A. and Mercer, "Environmental Health Consequences of Land Mines", *Int. J. Occup. Environ. Health*, c. 6, sy 3, ss. 243-248, Tem. 2000, doi: 10.1179/oeh.2000.6.3.243.

[5] "Know Thy Enemy and Know Yourself – The Role of Operational Data in Managing the Mines and Booby Trap Threat in Vietnam, 1965–73 - Roland Evans, Tracey Temple, Liz Nelson, 2024". Erişim: 12 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09683445241231654

[6] H. Kasban, O. Zahran, S. M. Elaraby, M. El-Kordy, ve F. E. Abd El-Samie, "A Comparative Study of Landmine Detection Techniques", *Sens. Imaging Int. J.*, c. 11, sy 3, ss. 89-112, Eyl. 2010, doi: 10.1007/s11220-010-0054-x.

[7] C. Camacho-Sanchez, R. Yie-Pinedo, ve G. Galindo, "Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas", *Socioecon. Plann. Sci.*, c. 88, s. 101611, Ağu. 2023, doi: 10.1016/j.seps.2023.101611.

[8] M. K. Habib, "Humanitarian Demining: Reality and the Challenge of Technology – The State of the Arts", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, c. 4, sy 2, s. 19, Haz. 2007, doi: 10.5772/5699.

[9] I. Baselt, A. Skejic, B. Zindovic, ve J. Bender, "Geologically-Driven Migration of Landmines and Explosive Remnants of War—A Feature Focusing on the Western Balkans", *Geosciences*, c. 13, sy 6, Art. sy 6, Haz. 2023, doi: 10.3390/geosciences13060178.

[10] E. M. A. Hussein ve E. J. Waller, "Landmine detection: the problem and the challenge", *Appl. Radiat. Isot.*, c. 53, sy 4, ss. 557-563, Kas. 2000, doi: 10.1016/S0969-8043(00)00218-9.

[11] A. Jomartov, A. Tuleshov, A. Kamal, ve A. Abduraimov, "Design of a cable-driven parallel robot for landmine detection", *SN Appl. Sci.*, c. 5, sy 11, s. 299, Eki. 2023, doi: 10.1007/s42452-023-05533-2.

[12] A. Barnawi, K. Kumar, N. Kumar, B. Alzahrani, ve A. Almansour, "A Deep Learning Approach for Landmines Detection Based on Airborne Magnetometry Imaging and Edge Computing", *Comput. Model. Eng. Sci.*, c. 139, sy 2, ss. 2117-2137, 2024, doi: 10.32604/cmes.2023.044184.

[13] “Environmental Influences on the Detection of Buried Objects with a Ground-Penetrating Radar”. Erişim: 12 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mdpi.com/2072-4292/16/6/1011

[14] G. Viesti *vd.*, “The detection of landmines by neutron backscattering: Exploring the limits of the technique”, *Appl. Radiat. Isot.*, c. 64, sy 6, ss. 706-716, Haz. 2006, doi: 10.1016/j.apradiso.2005.12.017.

[15] J. Deans, J. Gerhard, ve L. J. Carter, “Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface”, *Infrared Phys. Technol.*, c. 48, sy 3, ss. 202-216, Ağu. 2006, doi: 10.1016/j.infrared.2005.06.003.

[16] A. Barnawi, K. Kumar, N. Kumar, N. Thakur, B. Alzahrani, ve A. Almansour, “Unmanned Ariel Vehicle (UAV) Path Planning for Area Segmentation in Intelligent Landmine Detection Systems”, *Sensors*, c. 23, sy 16, Art. sy 16, Oca. 2023, doi: 10.3390/s23167264.

[17] J. Lee, H. Lee, S. Ko, D. Ji, ve J. Hyeon, “Modeling and Implementation of a Joint Airborne Ground Penetrating Radar and Magnetometer System for Landmine Detection”, *Remote Sens.*, c. 15, sy 15, Art. sy 15, Oca. 2023, doi: 10.3390/rs15153813.

[18] R. Anand, J. Andrew, ve I. Makki, “Optimizing land mine detection across diverse mining environments: A hyperspectral data approach with regression models”, *Int. J. Intell. Netw.*, c. 5, ss. 351-363, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.ijin.2024.08.004.

[19] L. F. Capitán-Vallvey ve A. J. Palma, “Recent developments in handheld and portable optosensing—A review”, *Anal. Chim. Acta*, c. 696, sy 1, ss. 27-46, Haz. 2011, doi: 10.1016/j.aca.2011.04.005.

[20] P. V. K. Yadav, B. Ajitha, Y. A. Kumar Reddy, ve A. Sreedhar, “Recent advances in development of nanostructured photodetectors from ultraviolet to infrared region: A review”, *Chemosphere*, c. 279, s. 130473, Eyl. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130473.

[21] T. Paul, D. Roy Choudhury, D. Ghosh, ve C. Saha, “Advancements in optical sensors for explosive materials Identification: A comprehensive review”, *Results Chem.*, c. 8, s. 101602, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2024.101602.

[22] N. A. Hatab, G. Eres, P. B. Hatzinger, ve B. Gu, “Detection and analysis of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) in environmental samples by surface-enhanced Raman spectroscopy”, *J. Raman Spectrosc.*, c. 41, sy 10, ss. 1131-1136, 2010, doi: 10.1002/jrs.2574.

[23] J. Wojtas, T. Stacewicz, Z. Bielecki, B. Rutecka, R. Medrzycki, ve J. Mikolajczyk, “Towards optoelectronic detection of explosives”, *Opto-Electron. Rev.*, c. 21, sy 2, ss. 210-219, Haz. 2013, doi: 10.2478/s11772-013-0082-x.

[24] M. López-López ve C. García-Ruiz, “Infrared and Raman spectroscopy techniques applied to identification of explosives”, *TrAC Trends Anal. Chem.*, c. 54, ss. 36-44, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.trac.2013.10.011.

[25] P. M. Pellegrino, E. L. Holthoff, ve M. E. Farrell, Ed., *Laser-Based Optical Detection of Explosives*. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781315215280.

[26] I. Makki, R. Younes, C. Francis, T. Bianchi, ve M. Zucchetti, “A survey of landmine detection using hyperspectral imaging”, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, c. 124, ss. 40-53, Şub. 2017, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.009.

[27] V. Sineglazov, K. Lesohorskyi ve V. Lytvynenko, “Intelligent hyperspectral image processing for landmine detection and classification,” in Proc. ProfIT AI 2024, CEUR Workshop Proc., Cambridge, MA, USA, Sep. 2024.

[28] I. Makki, “Hyperspectral Imaging for Landmine Detection”, phdthesis, POLITECNICO DI TORINO, 2017. Erişim: 12 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://theses.hal.science/tel-01706356

[29] A. D. Golovin ve A. V. Demin, “Optical-digital complex for detection of remote mines and mapping of minefields”, *J. Phys. Conf. Ser.*, c. 1096, sy 1, s. 012011, Eyl. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1096/1/012011.

[30] E. Vivoli, M. Bertini, ve L. Capineri, “Deep Learning-Based Real-Time Detection of Surface Landmines Using Optical Imaging”, *Remote Sens.*, c. 16, sy 4, Art. sy 4, Oca. 2024, doi: 10.3390/rs16040677.

[31] A. Filippidis, L. C. Jain, ve N. Martin, “Multisensor data fusion for surface land-mine detection”, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, c. 30, sy 1, ss. 145-150, Şub. 2000, doi: 10.1109/5326.827491.

[32] K. Kuru *vd.*, “Intelligent, Automated, Rapid, and Safe Landmine, Improvised Explosive Device and Unexploded Ordnance Detection Using Maggy”, *IEEE Access*, c. 12, ss. 165736-165755, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3493013.

[33] B. Shemer *vd.*, “Genome-wide gene-deletion screening identifies mutations that significantly enhance explosives vapor detection by a microbial sensor”, *New Biotechnol.*, c. 59, ss. 65-73, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.nbt.2020.06.002.

[34] Centre for Fire, Explosives & Environment Safety, Delhi, J. C. Kapoor, G. K. Kannan, ve 2Defence Bio-engineering and Electromedical Laboratory, Bangalore, “Landmine Detection Technologies to Trace Explosive Vapour Detection Techniques”, *Def. Sci. J.*, c. 57, sy 6, ss. 797-810, Kas. 2007, doi: 10.14429/dsj.57.1818.

[35] J. W. Grate, R. G. Ewing, ve D. A. Atkinson, “Vapor-generation methods for explosives-detection research”, *TrAC Trends Anal. Chem.*, c. 41, ss. 1-14, Ara. 2012, doi: 10.1016/j.trac.2012.08.007.

QUANTUM IMAGING FOR REMOTE SENSING AND DEFENCE: A MINI-REVIEW ON CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Muhammed Faruk ŞAHİN

Research Assistant, Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul-Türkiye **(**Corresponding Author) ORCID: 0009-0007-8901-6410

Emine US

Research Assistant, Istanbul Aydın University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, İstanbul- Türkiye, ORCID: 0009-0000-6869-6903

Fatma Betül OKUR

National Defence University, Atatürk Strategic Studies and Graduate Institute, Department of Computer Engineering, İstanbul- Türkiye, ORCID: 0009-0008-6310-4524

Ahmet ÖZCAN

Assistant Professor, Cappadocia University, Department of Artificial Intelligence and Machine Learning, İstanbul- Türkiye, ORCID: 0000-0002-1098-7078

ABSTRACT

In recent years, remote sensing and military applications have gained critical importance in target detection, situational awareness, and long-range imaging. These applications rely on technologies that utilize specific electromagnetic spectrum bands, particularly within optical and infrared imaging systems. However, these conventional methods face significant challenges due to their dependence on complex optical setups, high energy requirements, susceptibility to environmental disturbances, and limited functionality in low-light environments or in scenarios where direct interaction between the object and the imaging system is not feasible. Quantum-based imaging techniques offer various advantages to overcome the limitations of traditional optical systems. Leveraging quantum correlations, entangled photon pairs, and high sensitivity under low-light conditions, these approaches enable information extraction under weak signal regimes. Consequently, they provide high-precision imaging under adverse conditions such as low illumination and environmental obstructions, along with features such as object-image discrimination and inter-frame motion estimation, making them highly advantageous for applications like aircraft classification, target tracking, and defence systems. This mini-review aims to evaluate the current status and future potential of quantum-based imaging techniques within the context of remote sensing and defence applications. Compared to conventional methods, quantum imaging offers improved noise reduction, mitigation of motion blur, imaging through optical turbulence and under poor lighting conditions, as well as frame correction and turbulence compensation. Furthermore, when combined with compressive sensing and deep learning-based reconstruction techniques, these systems enable reliable and real-time imaging even under challenging environmental conditions. Nonetheless, limitations such as high computational demand and difficulties in data processing for real-time applications are also addressed. The study provides a comprehensive overview of how quantum imaging techniques contribute to solving existing challenges in remote sensing and military domains.

Keywords: Quantum Imaging, Remote Sensing, Defence Applications, Low-Light Imaging, Deep Learning Reconstruction.

GİRİŞ

Geleneksel görüntüleme sistemleri optik mikroskopi (Ntziachristos, 2010), dijital kamera(Chen vd., 2009), X-ışını(Berger vd., 2018), ve çeşitli görüntüleme sistemleri (Aburaed vd., 2023; Rusev vd., 2024; Sharma vd., 2006) ile çevremizdeki dünyayı ayrıntılı bir şekilde görüntülemede temel bir rol oynamaktadır. Ancak, bu yöntemler ışığın yetersiz olduğu veya nesne ile görüntüleme sistemi arasında doğrudan bir etkileşimin mümkün olmadığı ortamlarda önemli zorluklarla karşılaşmaktadır (Luesia vd., 2022; Padgett & Boyd, 2017). Bu zorluklar, düşük ışık koşullarında görüntü kalitesin bozularak detayların kaybolmasına ve gürültü seviyesinin artmasına neden olmaktadır(Tan vd., 2023). Bu durum özellikle askeri uygulamalar(Tang vd., 2018) ve uzaktan algılama sistemleri (Shumigai vd., 2024) için kritik bir sorun olmaktadır. Bir diğer önemli sınırlama ise geleneksel sistemlerde genellikle hedefin doğrudan görüş alanında olmasını gerektirmektedir (Velten vd., 2012). Bu durum, özellikle nesnenin önünde engellerin bulunduğu askeri ve uzaktan görüntülemede karmaşık ortamlar bulunması sebebiyle zorluk oluşturarak ayrıntılı analiz ve karar verme süreçlerini zorlaştırmaktadır (O'Toole vd., 2018). Mevcut zorluklar, geleneksel yöntemlerin yetersizliklerini ortaya koyarak ileri görüntüleme tekniklerinin geliştirilmesine yol açmakta ve Ghost Imaging (GI) yönteminin geliştirilmesini sağlamaktadır (Abbas vd., 2025).

GI, kuantum mekaniği prensiplerine dayanan bir yöntem olarak, ışık alanındaki yoğunluk korelasyonlarını kullanarak, nesne ile kamera dedektörü arasında doğrudan bir etkileşim gerektirmeksizin nesne bilgisini yeniden yapılandırmayı amaçlamaktadır (Abbas vd., 2025). Bu teknik, nesneyle ilişkili ışığın bir ışık kaynağı ve referans dedektör aracılığıyla ölçüldüğü iki aşamalı bir süreci içermekte ve görüntü, elde edilen korelasyon verilerinden yeniden yapılandırılmaktadır (Clemente vd., 2012; Erkmen & Shapiro, 2010). Başlangıçta GI, dolanık foton çiftleri aracılığıyla, iki ışık demeti arasındaki uzak kuantum korelasyonlar sayesinde nesnenin yeniden oluşturulabildiği bir yöntem olarak tanımlanmıştır (Strekalov vd., 1995). Daha sonra, GI'ın klasik olarak korele ışınlarla da uygulanabildiği gösterilerek foton düzeyindeki hassasiyet ve doğruluğu artıran umut verici bir kuantum görüntüleme yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Bennink vd., 2002; R. Meyers vd., 2008; Scarcelli vd., 2006). Ancak tüm bu avantajlarına rağmen GI yönteminin kendine has yeniden yapılandırma (Rizvi vd., 2020), hesaplama maliyeti(He vd., 2023), veri azlığı (Q. Wang vd., 2023) ve çeşitli sınırlamaları (F. Wang vd., 2019; Wu vd., 2020) bulunmaktadır. Bu sınırlamalar, GI sistemlerinin pratik uygulamalarda etkin şekilde geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Ancak son dönemde GI, tıp, askeri ve uzaktan algılama gibi alanlarda hem kuramsal hem deneysel açıdan yoğun ilgi görmektedir.

MOTİVASYON VE KATKI

GI, görüntüleme teknolojilerinde yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Ancak uzaktan algılama ve askeri uygulama alanlarına özgü çeşitli zorluklar, GI teknolojisinin pratik uygulamalarda etkin şekilde kullanılmasını sınırlamaktadır. Bu çerçevede GI tabanlı yaklaşımların hesaplama verimliliği, düşük ışıkta görüntüleme, güvenlik ve sistem dayanıklılığı avantajlarıyla dikkat çekmekte ve güncel literatüründe artan ilgi görmektedir. Bu mini derleme, GI'ın uzaktan algılama ve askeri uygulamalardaki işlevi ve rolüne odaklanarak ilgili alanlardaki çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

- **Uzaktan Algılama:** Uydu ve İnsansız Hava Aracı (İHA) tabanlı görüntülemede, GI düşük çözünürlüklü veya sınırlı veri kümelerinden anlamlı bilgi elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle arazi kullanımı ve çevresel izleme uygulamalarında, görüntü yeniden yapılandırma ve sınıflandırma süreçlerine önemli katkılar sağlamaktadır.
- **Askeri Alan:** GI, düşük görüş koşulları ve karmaşık çevresel faktörlerin bulunduğu ortamlarda hedef tespiti ve görüntüleme süreçlerinde sağladığı verimli performans ile askeri gözetim sistemlerinin etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle düşük ışık koşullarında, hedeflerin hızlı biçimde tanımlanmasına olanak tanıyarak, kritik görevlerde güvenilir ve etkili çözümler sunmaktadır.

Bu derleme, güncel literatürü sistematik ve kapsamlı bir şekilde değerlendirerek GI tabanlı yaklaşımlara ilişkin mevcut durumu ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu çerçevede, uygulama alanlarına özgü zorluklar ve kısıtlar tanımlanacaktır. GI yönteminin avantajları ve dezavantajları bütüncül bir bakış açısıyla ele alınacaktır. Elde edilen bulguların, GI odaklı araştırmalarda daha etkili ve yenilikçi çözümler geliştirilmesine katkı sağlaması öngörülmektedir. Çalışmanın temel katkıları aşağıda sunulmaktadır.

- Literatürde, GI tabanlı yaklaşımlara yönelik derinlikli ve sistematik incelemelerin çok kısıtlı olması, alandaki bilimsel ilerlemenin önünde kayda değer bir engel oluşturmaktadır. Bu çalışma, söz konusu yapısal boşluğu doldurmayı hedefleyerek GI teknolojisinin kuramsal temellerini, uygulama alanlarını ve karşılaşılan zorlukları bütüncül bir perspektifle ele alan yüksek nitelikli ve yol gösterici bir başvuru kaynağı sunmaktadır.
- Bu çalışma, GI tekniklerinin uzaktan algılama ve askeri uygulama alanlarında karşılaşılan zorlukların aşılmasındaki önemini vurgulamaktadır.
- GI tabanlı yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri, her bir uygulama alanında karşılaşılan mevcut teknik sorunlarla birlikte incelenmiştir. Bu analiz, araştırmacıların temel teknik kısıtları belirlemesine yardımcı olmayı ve GI'ın bu sınırlamaların aşılmasındaki potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

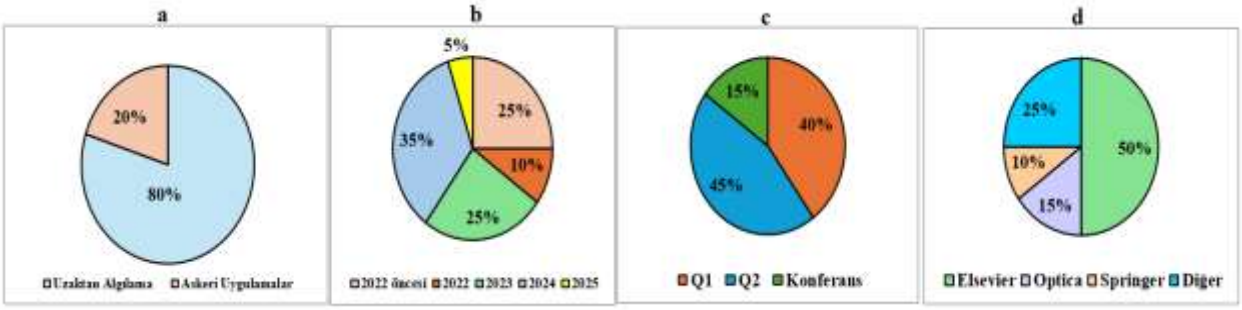
GI TABANLI UYGULAMA ALANLARI

Son yıllarda kuantum hesaplama alanında yaşanan gelişmelerle birlikte, GI teknolojisinin uzaktan algılama (Lai vd., 2023) ve askeri uygulamalar (Fabbri vd., 2022) dahil olmak üzere çeşitli uygulama alanlarında kullanımı artmaktadır. Bu alanlara özgü zorluklar ve sınırlamalar nedeniyle GI, günümüzde araştırmaların odağında yer almaya devam etmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, GI teknikleri genellikle geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek performans sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu bölümde, GI tekniklerinin uzaktan algılama ve askeri uygulama alanlarında geleneksel yaklaşımları geliştirmek amacıyla kullanıldığı çalışmalara odaklanılmaktadır.

DERLENEN ÇALIŞMALARA AİT SAYISAL VERİLER

Bu kısımda, GI uygulama alanlarındaki derlenen çalışmalara ilişkin istatistiksel bilgiler sunulmaktadır. Bu verilerin özet tablosu Şekil 1'de verilmektedir. Bu çalışma, GI tekniğinin uygulama alanlarındaki rolünün kapsamlı bir analizini sağlamak için sistematik bir inceleme metodolojisi kullanmaktadır. Bu değerlendirme için çalışmaların seçimi belirli dahil etme ve

hariç tutma kriterlerine dayanmaktadır. Dahil etme gereklilikleri, her çalışmanın GI tekniğini kullanması, uygulama alanına doğrudan uygulanabilirlik göstermesi ve prestijli akademik yayınlarda veya konferanslarda yayınlanmasından oluşmaktadır. Uzaktan algılama alanında 16, askeri uygulamalarda ise 4 yayın yer almakta olup, yıllara göre 2022 öncesi 5, 2022'de 2, 2023'te 5, 2024'te 7 ve 2025'te 1 yayın derlemeye alınmıştır. Yayınevleri arasında Elsevier 10 yayınla öne çıkarken, Optica 3, Springer 2 ve diğer yayınevleri AIP, APS, IEEE, SPIE olmak üzere konferanslar ile toplam 5 yayınla temsil edilmektedir. Yayınların kalite dağılımında ise 8'i Q1, 9'u Q2 dergilerde, 3'ü konferans bildirisi olarak yer almaktadır. Bu veriler, uzaktan algılama alanındaki çalışmaların daha yoğun olduğunu ve son yıllarda yayın sayısında artış yaşandığını göstermektedir.



Şekil 1. a) Derlenen çalışmaların dağılımı, **b)** Çalışmaların yıllara göre dağılımı, **c)** Çalışmaların indekslerine göre dağılımı, **d)** Çalışmaların yayınevlerine göre dağılımı

UZAKTAN ALGILAMA TABANLI UYGULAMALAR

Uzaktan algılama uygulamalarında kullanılan görüntüleme sistemleri, tipik olarak yüksek çözünürlüklü dedektör dizileri, gelişmiş optik mimariler ve geniş ölçekli elektronik bileşenlerden oluşmaktadır (Jacobsen, t.y.). Bu karmaşık optik sistemler, yüksek çözünürlük, geniş görüş alanı, düşük optik sapma ve farklı dalga boyları aralığında yüksek duyarlılık sağlamak üzere tasarlanmaktadır (Manion & Stokkermans, 2025; Yang vd., 2023). Ancak, karmaşık optiklerin kullanımı boyut, ağırlık, enerji tüketimi ve çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir (Fu vd., 2024; Xiang vd., 2024). GI, geleneksel optik lenslere olan gereksinimi ortadan kaldırma ve alıcı sistemleri sadeleştirme yeteneğiyle, uzaktan algılamada karşılaşılan yapısal sınırlamaların aşılmasında dikkate değer bir potansiyel sunmaktadır(Erkmen, 2012). Bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar, GI'ın etkinliğini ortaya koyarak yöntemin sınırlarını ve uygulama alanlarını genişletmektedir. Özellikle düşük ışık koşulları, uzun mesafeler ve atmosferik bozulmalar ve çeşitli zorlu çevresel koşullar altında GI'ın performansını değerlendirmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmada incelenen GI tabanlı uzaktan algılama araştırmaları Tablo 1'de özetlenmektedir.

Uzaktan algılama uygulamalarında atmosferik türbülans sorununu iyileştirmek amacıyla Hesaplamalı Hayalet Görüntüleme (Computational Ghost Imaging – CGI) yöntemi önerilmektedir. CGI, sahne görüntüsünün geleneksel bir kamera yerine tek piksel dedektör kullanılarak görüntünün yeniden elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemlerine ve yoğun işlem gücüne olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır (Erkmen, 2012). Ancak şiddetli atmosferik türbülans koşullarında, CGI'nin performansında belirgin bir kayıp gözlemlenmektedir. Bu sorunu iyileştirmek amacıyla türbülans etkisini azaltan Quantum

Machine Learning (QML) tabanlı hibrit yöntemler (Xiao vd., 2023)ve X-ray-GI (XGI) uygulamalarında da kullanılan GI-Deep Neural Network Constraint (GIDC) yöntemi önerilmektedir(Lee vd., 2024). Önerilen yöntem, kuantum hesaplama ile makine öğrenmesinin birleşiminden doğan bir araştırma alanı olmasıyla birlikte kuantum hesaplamanın özelliklerinden yararlanarak makine öğrenmesi algoritmalarının performansını ve verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, fiziksel olarak elde edilen kova (bucket) sinyallerine QML uygulanması, GI uygulamalarının pratik sınırlarını önemli ölçüde genişletmektedir. Böylece, Kuantum-klasik hibrit modeller kullanılarak GI görevlerinde klasik makine öğrenimi yöntemlerine kıyasla hem nesne tanımlama hem de görüntüleme süreçlerinde %10'a kadar daha verimli performans göstermektedir. Bu yaklaşım, yalnızca görüntüleme kalitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda GI sistemlerinin farklı pratik senaryolarda uygulanabilirliğini de genişletmektedir. Öte yandan, GIDC yöntemi, güçlü türbülans gibi zorlu koşullar altında yüksek kaliteli görüntüleme sağlayarak radyasyon maruziyetini azaltması ile yüksek performans sergilemektedir. Ancak, önerilen yöntemde veri artırma sürecinin uygulanmaması, modelin farklı ve daha geniş senaryolara genelleme yeteneğini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu sınırlılığın giderilebilmesi için, modelin genişletilmiş ve çeşitlendirilmiş veri kümeleriyle eğitilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Coakley vd., 2024).

GI tabanlı uzaktan algılama uygulamalarında karşılaşılan bir diğer önemli zorluk ise hedef nesnenin konumu ve boyutuna ilişkin belirsizliğin bulunması sebebiyle pratik senaryolarda çoğu zaman yetersiz kalmaktadır. Bu problemi iyileştirmek amacıyla ışık korelasyonu ile ışık alanı görüntüleme prensiplerini deneysel olarak birleştiren görüntüleme yöntemi olan Işık Alanı Hayalet Görüntüleme (Light-Field Ghost Imaging) önerilmektedir (Paniate vd., 2024). Önerilen yöntem, nesne mesafesine ilişkin ön bilgi gereksinimini ortadan kaldırarak üç boyutlu görüntüleme olanağı sağlamaktadır. Ancak, yüksek hesaplama karmaşıklığı önemli bir sınırlılık oluşturduğundan bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla Hadamard Modülasyonlu Gauss Dizi Işını (Hadamard Modulated Gaussian Array Beam – HMGAB) yaklaşımı önerilmektedir (Yin vd., 2025). Önerilen yöntem, geleneksel ışık kaynaklarına kıyasla daha yüksek ışık yayma gücü sunmakta ve optik faz dizili ışınlardan kaynaklanan periyodik örtüşme (periodic aliasing) sorununu üst üste binme özelliğiyle ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, Hadamard matrislerinin ortogonal yapısı, gürültü azaltımına katkı sağlayarak algılama duyarlılığını artırmaktadır. Uzaktan algılama uygulamalarında karşılaşılan bir diğer sorun ise rastgele dağılmış noktasal ve parazitik bozulmalar sebebiyle görüntü kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bozulmalar, görüntüleme performansını anlamlı düzeyde artıran Generative Adversarial Network (GAN) tabanlı yaklaşımlar kullanılarak büyük ölçüde iyileştirilmektedir(He vd., 2022)**.** Ancak, önerilen yöntemin gürültüye duyarlılığı ve sınırlı uzamsal çözünürlüğü, uygulamalarda performans kaybına neden olmak ve bu sınırlamaları aşmak amacıyla, CGI tabanlı spektral süper süreklilik kaynağı kullanılarak çoklu spektral kanal iletimine dayalı yöntem önerilmektedir (Huang vd., 2020; Shumigai vd., 2024). Önerilen yöntemin deneysel sonuçları, spektral kanal sayısının artırılmasının kontrast-gürültü oranını (CNR) 2.8 kat iyileştirerek veri edinim sürecini hızlandırmakta ve görüntü kontrastını iyileştirmektedir. Ancak, geleneksel CGI yöntemlerinin gerçek zamanlı veri işleme kapasitesinin sınırlı olması sebebiyle Derin Sinir Ağları (DNN) tabanlı yaklaşım önerilmektedir (Rizvi vd., 2020). Önerilen yöntem, rastgele desenler kullanarak düşük örnekleme oranlarında %10–20 oranında daha hızlı ve daha verimli bir şekilde görüntüyü yeniden yapılandırılmaktadır. Ancak, bu yöntemin hareketli görüntülerde sınırlamaları

bulunması sebebiyle Deep Convolutional Autoencoder Network (DCAN) kullanılarak hareketli görüntüler için DeepGhost yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, Autoencoder mimarisi ile düşük örnekleme koşullarında gerçek zamanlı görüntüleme olanağı sağlamaktadır. Ancak, CGI uygulamalarında Nyquist örnekleme koşullarında gürültü giderme ve görüntü kalitesinin artırılması genel bir zorluk olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, DNN tabanlı DDANet yöntemi önerilmektedir (Wu vd., 2020). Önerilen yöntem, tek boyutlu kova sinyalleri ile ayarlanabilir gürültü seviyelerini temsil eden haritaları giriş verisi olarak kullanmaktadır. Bu sayede, gürültü düzeyleri optimize edilerek düşük örnekleme oranlarında daha yüksek verimlilikle görüntüleme gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, modelin eğitim sürecinde yalnızca simülasyon verilerine dayanması sebebiyle gerçek dünya koşullarında doğruluk ve güvenilirlik açısından kapsamlı biçimde değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla optik deneylerden elde edilen yeniden yapılandırılmış görüntüler ile bunlara karşılık gelen gerçek (ground truth) görüntüler kullanılarak DNN eğitimi gerçekleştiren GIDL yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem, veri edinim süresini iyileştirerek sistemin pratik uygulanabilirliğini artırmaktadır (Lyu vd., 2017). Hareketli nesnelerin yeniden yapılandırılmasını hedefleyen bir diğer çalışmada ise Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı MTGI yöntemi önerilmektedir (Q. Liu vd., 2024). Önerilen yöntem, ön bilgi gerektirmeksizin kova dedektör tarafından toplanan tek boyutlu sinyalleri işleyerek yüksek kaliteli görüntüleri yeniden yapılandırmaktadır. DNN tabanlı model aracılığıyla hareketli hedeflerin dinamikleri öğrenilerek daha verimli görüntü rekonstrüksiyonu sağlanmaktadır. Ancak, yöntemin optimizasyon süreçleri zaman açısından oldukça maliyetli olmakta ve bunu iyileştirmek için Frame Correction Algorithm (FCA) yöntemi önerilmektedir (Feng vd., 2024). Önerilen yöntem, U-Net mimarisinden türetilmiş olup her katmanda ayarlanabilir kanal sayısı özelliğine sahip olmaktadır. Yukarı örneklemeden (up-sampling) sonra gerçekleştirilen çoklu evrişim işlemleriyle kanal sayısı kademeli olarak azaltılmaktadır. Ağın geri kalan yapısı ise standart U-Net özelliklerini korumaktadır. Bu sayede, görüntü kalitesinde iyileştirme sağlanmakta ve göreli hata oranı %10'un altında tutulmaktadır. Ancak, uzun menzilli GI uygulamaları, yüksek korelasyon katsayıları nedeniyle çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu sorunun çözümü için Ordered Subset Expectation Maximization (OSEM) temelli bir alt küme bölme yöntemi önerilmektedir(Zhou vd., 2023). Önerilen yöntem, görüntülerin iteratif olarak iyileştirilmesini sağlayarak sinyal-gürültü oranını (SNR) artırmaktadır. Böylece uzun menzilli GI tabanlı LiDAR ve uzaktan algılama uygulamalarında daha verimli doğruluk sağlamaktadır. Ancak, yöntemin farklı duyarlılık düzeylerine sahip senaryolarda deneysel olarak yeterince doğrulanmamış olması ve geleneksel GI sistemlerinin düşük ışık koşullarında performans kaybı yaşaması, başlıca sınırlamalar arasında yer almaktadır.

Tablo 1. Uzaktan algılama uygulama senaryolarına göre GI yöntemlerinin dağılımı

Senaryo	Önerilen Yöntem	Avantajlar / Özellikler	Ref.
Atmosferik türbülans & Uzun menzilli görüntüleme	CGI	Lens gerektirmeyen görüntüleme	(Erkmen, 2012)
	QML tabanlı GI	Artırılmış öğrenme verimliliği, kuantum-klasik hibrit modeller	(Xiao vd., 2023)
	GIDC	Türbülans altında görüntüleme, düşük radyasyon maruziyeti	(Coakley vd., 2024; Lee vd., 2024)
Bilinmeyen nesne konumu / boyutu	Light-Field GI	Mesafe bilgisi gerektirmeyen 3B görüntüleme, ışık korelasyonu ve ışık alanı prensiplerini birleştirir	(Paniate vd., 2024)
	HMGAB	Yüksek ışık çıkışı, ortogonal Hadamard matrisleri ile gürültü azaltımı, örtüşme (aliasing) engelleme	(Yin vd., 2025)
Noktasal yapaylık giderimi & Kısa menzilli görüntüleme	GAN tabanlı GI	Yapaylıkların etkili şekilde giderilmesi ile görüntü kalitesinde artış, sınırlı uzamsal çözünürlük	(He vd., 2022)
	Spektral CGI	Artırılmış kontrast-gürültü oranı, hızlandırılmış çok spektralli veri edinimi	(Huang vd., 2020; Shumigai vd., 2024)
	DeepGhost	Düşük örnekleme oranlarında dinamik sahnelerin gerçek zamanlı görüntülenmesi	(Rizvi vd., 2020)
	DDANet tabanlı GI	Gürültü düzeyi haritalaması ile gürültü azaltımı, simülasyon verileri ile eğitim	(Wu vd., 2020)
	GIDL	Deneysel olarak elde edilmiş yeniden yapılandırmalarla model eğitimi, artırılmış doğruluk	(Lyu vd., 2017)
	MTGI ve CNN	Ön bilgi olmadan hareketli nesnelerin yeniden	(Q. Liu vd., 2024)

		yapılandırılması, hedef dinamiklerinin modellenmesi	
	GFNN + FCA	U-Net türevi, yeniden yapılandırma hatasını azaltır	(Feng vd., 2024)
Uzun menzilli GI / LiDAR	OSEM tabanlı GI	Yinelemeli görüntü iyileştirme, geliştirilmiş SNR	(Zhou vd., 2023)

SAVUNMA VE ASKERİ SİSTEMLERE YÖNELİK UYGULAMALAR

Bu kısımda, GI tabanlı savunma ve askeri uygulamalarla ilgili çalışmalar incelenmektedir ve Tablo 2'de özetlenmektedir. Nesnelerin yer değiştirmesi veya dönmesi durumlarını takip edebilme ve nesneleri arka plandan ayırt edebilme yetenekleri sayesinde GI teknolojisinin ulusal savunma ve askeri alanlardaki önemli potansiyelini vurgulamaktadır (Shi vd., 2023). Ek olarak GI, duman, sis ve opak malzemeler gibi çevresel engellerle örtülmüş nesnelerin tespitini ve görselleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda, sınırlı görüş koşullarında kuantum optik teknikler aracılığıyla görüntüleme yeteneklerini geliştirmeyi amaçlayan foton korelasyon analizine dayalı yöntem önerilmektedir (R. E. Meyers vd., 2008). Önerilen yöntem, Fourier dönüşümleri ve Bayes istatistiksel modeller kullanarak gürültüyü azaltmakta ve bu sayede yüksek çözünürlüklü yeniden yapılandırılmış görüntüler elde etmektedir. Ancak, düşük ışık koşulları ve yüksek gürültü seviyeleri altında sistem performansında verimsizlik oluşmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla, düşük örnekleme oranlarında hareketli nesnelere yönelik GI işlemlerinin hızını ve kalitesini artırmak üzere tasarlanmış Group Frame Neural Network (GFNN) yöntemi önerilmektedir (Feng vd., 2024). Bu yöntem, örnekleme oranı %6.25 kadar düşük seviyelerde bile yüksek kaliteli görüntü yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle yüksek hızlı dönen nesnelerde hareket bulanıklığını azaltmakta ve farklı perspektiflerden görüntü elde etmeye olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, geleneksel GI yöntemleri düşük SSIM ve PSNR değerlerine sahip olup yetersiz görüntü kalitesi üretmektedir. Öte yandan, DNN tabanlı GI teknikleri genellikle yüksek hesaplama gücü ve uzun eğitim süreleri gerektirmektedir. Bu zorluklara çözüm olarak Compressive Turbulence-Free Ghost Imaging (CTFGI) ve Compressive Ghost-Imaging-Inspired Imaging (GIII) yöntemleri önerilmektedir (R. E. Meyers & Deacon, 2010). Önerilen CTFGI yöntemi, optik türbülansın olumsuz etkilerini azaltmayı hedefleyerek şiddetli türbülans koşullarında daha verimli görüntüleme sağlamaktadır. Önerilen GIII yöntemi ise piksel dedektör tabanlı sistemlerin yetersiz olduğu senaryolarda alternatif bir çözüm sunmakta ve daha az veriyle yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilerek zorlu çevresel koşullarda arka plan gürültüsü bastırılmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin düşük ışık koşullarında performans kaybı yaşaması ve büyük veri setlerinde hesaplama maliyetinin artması bir zorluk oluşturmaktadır. Bu dezavantajları iyileştirmek için uzun dalga kızılötesi (LWIR) aralığında sıcak nesnelerin termal görüntülerini elde edebilen bir CGI tekniği önerilmektedir (H.-C. Liu & Zhang, 2017). Önerilen yöntem, düşük örneklem sayılarıyla yüksek çözünürlüklü termal görüntüler üretmektedir. Tüm bu çalışmalar göz önüne alındığında GI teknikleri, düşük görüş koşullarında yüksek hassasiyetli görüntüleme sağlayarak askeri uygulamalar için büyük

bir potansiyel sunmaktadır. Çerçeve düzeltme algoritmaları, sıkıştırılmış algılama ve türbülanstan arındırılan görüntüleme gibi gelişmeler, görüntü kalitesini artırmakta, hareket bulanıklığını azaltmakta ve çevresel gürültüye karşı dayanıklılığı güçlendirmektedir. Bu iyileştirmeler, zorlu koşullarda gerçek zamanlı hedef tespiti, gözetleme ve durumsal farkındalık uygulamalarını mümkün kılmaktadır. Derin öğrenme ve gelişmiş yeniden yapılandırma algoritmalarının entegrasyonu, sistem performansını daha da optimize ederek savunma ve güvenlik operasyonları için güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Tablo 2. Savunma ve askeri alanlarda GI uygulamaları

Senaryo	**Önerilen Yöntemler**	**Özellikler**	**Ref.**
Gürültü ve engelli ortamda düşük görüşle görüntüleme	Foton korelasyonu ve Bayes istatistiksel model	Kuantum optik tabanlı analiz, Fourier gürültü giderme, istatistiksel yeniden yapılandırma	(R. E. Meyers vd., 2008)
Hareketli/dönen hedeflerin gerçek zamanlı görüntülenmesi	GFNN	Hareket bulanıklığı azaltma, çoklu bakış açısından görüntüleme, düşük örneklemeli yeniden yapılandırma	(Feng vd., 2024)
Atmosferik türbülans altında görüntüleme	CTFGI ve GIII	Türbülansa dayanıklı kodlama, arka plan gürültüsü bastırma, Nyquist-altı örnekleme	(R. E. Meyers & Deacon, 2010)
Aydınlatma olmaksızın LWIR bandında termal görüntüleme	CGI	Pasif kızılötesi algılama, seyrek örnekleme, tek pikselli yeniden yapılandırma	(H.-C. Liu & Zhang, 2017)

SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu derleme çalışması, GI teknolojisinin özellikle uzaktan algılama ve askeri uygulamalar başta olmak üzere, gelişmekte olan alanlardaki konumunu kapsamlı biçimde incelemektedir. GI, düşük ışık seviyelerinde, gürültülü ortamlarda ve karmaşık sahalarda yüksek kaliteli görüntü elde etme potansiyeli ile geleneksel görüntüleme yöntemlerine kıyasla belirgin avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, donanımsal karmaşıklığı azaltma, düşük örnekleme oranlarında veri toplama yeteneği ve hesaplamalı yöntemlerle görüntü iyileştirme özellikleri sayesinde kritik operasyonel koşullarda güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Bu çalışmada ele alınan literatür, GI tekniklerinin atmosferik türbülans, hareketli hedef takibi, uzun menzilli algılama, gürültü azaltma, görüntü netliği artırımı ve çeşitli zorlukları çözme potansiyelini ortaya koymaktadır. DNN tabanlı modeller, sıkıştırılmış algılama algoritmaları, kuantum makine öğrenimi ve ışık alanı görüntüleme gibi yeni yöntemler GI'ın yeteneklerini genişletmekte ve gerçek zamanlı uygulamalar için uygulanabilirliğini

artırmaktadır. Ancak, düşük ışık koşullarında performans düşüklüğü, yüksek hesaplama maliyeti, simülasyon verisine dayalı eğitim süreçleri ve sınırlı deneysel doğrulama gibi bazı temel zorluklar varlığını sürdürmektedir. Gelecekte GI sistemlerinin daha yaygın, güvenilir ve yüksek verimli hale gelmesi için aşağıdaki araştırma yönleri kritik öneme sahiptir:

1. Gerçek Dünya Koşullarında Doğrulama: Simülasyon yerine deneysel verilerle eğitilmiş DNN modellerinin geliştirilmesi, sistemin sahadaki performansını artıracaktır.
2. Düşük Işık ve Dinamik Sahnelere Uyum: Yüksek gürültü toleranslı ve hareketli hedefleri işleyebilen modellerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.
3. Donanımsal İyileştirme ve Hızlandırma: FPGA/GPU destekli sistem tasarımları, gerçek zamanlı uygulamalara geçişi kolaylaştıracaktır.
4. Kuantum ve klasik hibrit yöntemlerin entegrasyonu: Kuantum dolanıklık temelli sistemlerle daha güvenli ve çözünürlüğü yüksek GI sistemleri geliştirilebilir.
5. Alanlara Özgü Yöntem Konfigürasyonları: Özellikle savunma sanayi, insansız hava araçları ve termal algılama sistemlerinde GI'ın özelleştirilmiş versiyonlarının kullanımı araştırılmalıdır.

Sonuç olarak, GI tabanlı görüntüleme sistemleri yüksek çözünürlük, bilgi güvenliği, hesaplama verimliliği başta olmak üzere temel alanlarda sağladığı avantajlarla yalnızca akademik araştırmalarda değil, aynı zamanda savunma ve uzaktan algılama gibi kritik uygulama alanlarında da güçlü bir potansiyele sahiptir. Bu derleme çalışmasının, GI teknolojisinin daha işlevsel, güvenilir ve ölçeklenebilir çözümler üretmesine katkı sunarak gelecekteki disiplinler arası araştırmalara yön vermesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Abbas, A., Mu, J., Mengyue, Z., Cao, J., & Zhang, X. (2025). Target recognition in ghost imaging from traditional to advance; a brief review. *Optics & Laser Technology*, *184*, 112450. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.112450

Aburaed, N., Alkhatib, M. Q., Marshall, S., Zabalza, J., & Al Ahmad, H. (2023). A Review of Spatial Enhancement of Hyperspectral Remote Sensing Imaging Techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *16*, 2275-2300. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3242048

Bennink, R. S., Bentley, S. J., & Boyd, R. W. (2002). "Two-Photon" Coincidence Imaging with a Classical Source. *Physical Review Letters*, *89*(11), 113601. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.113601

Berger, M., Yang, Q., & Maier, A. (2018). X-ray Imaging. İçinde A. Maier, S. Steidl, V. Christlein, & J. Hornegger (Ed.), *Medical Imaging Systems* (C. 11111, ss. 119-145). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96520-8_7

Chen, J., Venkataraman, K., Bakin, D., Rodricks, B., Gravelle, R., Rao, P., & Ni, Y. (2009). Digital Camera Imaging System Simulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, *56*(11), 2496-2505. https://doi.org/10.1109/TED.2009.2030995

Clemente, P., Durán, V., Tajahuerce, E., Torres-Company, V., & Lancis, J. (2012). Single-pixel digital ghost holography. *Physical Review A*, *86*(4), 041803. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.041803

Coakley, K. J., Chen-Mayer, H. H., Ravel, B., Josell, D., Klimov, N. N., Hussey, D. S., & Robinson, S. M. (2024). Emission ghost imaging: Reconstruction with data augmentation. *Physical Review A*, *109*(2), 023501. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023501

Erkmen, B. I. (2012). Computational ghost imaging for remote sensing. *JOSA A*, *29*(5), 782-789. https://doi.org/10.1364/JOSAA.29.000782

Erkmen, B. I., & Shapiro, J. H. (2010). Ghost imaging: From quantum to classical to computational. *Advances in Optics and Photonics*, *2*(4), 405-450. https://doi.org/10.1364/AOP.2.000405

Fabbri, N., De Natale, P., & Cataliotti, F. S. (2022). Quantum sensing technologies for Defence applications: The project QUANDO. *2022 23rd International Radar Symposium (IRS)*, 294-299. https://doi.org/10.23919/IRS54158.2022.9904994

Feng, S.-G., Chen, D., Wang, H.-H., Cao, J.-N., Zhang, Z.-W., Gu, Y.-S., Xiao, H.-Y., Zhang, C.-Q., Zhang, Z., & Gao, L. (2024). Ghost image of rotating object with group frame neural network combining frame correction algorithm. *Optics & Laser Technology*, *170*, 110241. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110241

Fu, T., Zhang, J., Sun, R., Huang, Y., Xu, W., Yang, S., Zhu, Z., & Chen, H. (2024). Optical neural networks: Progress and challenges. *Light: Science & Applications*, *13*(1), 263. https://doi.org/10.1038/s41377-024-01590-3

He, Y., Chen, Y., Luo, S., Chen, H., Li, J., & Xu, Z. (2022). Generative-Adversarial-Networks-based Ghost Recognition. *Physical Review A*, *106*(2), 023710. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.023710

He, Y., Yuan, S., & Song, J. (2023). Ghost imaging object recognition based on self-attention mechanism network. *AIP Advances*, *13*(12), 125120. https://doi.org/10.1063/5.0177610

Huang, J., Shi, D., Meng, W., Zha, L., Yuan, K., Hu, S., & Wang, Y. (2020). Spectral encoded computational ghost imaging. *Optics Communications*, *474*, 126105. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126105

Jacobsen, K. (t.y.). *HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGING SYSTEMS - OVERVIEW*.

Lai, W., Lei, G., Meng, Q., Ma, Y., Cui, W., Shi, D., Liu, H., Wang, Y., & Han, K. (2023). Ghost imaging based on Fermat spiral laser array designed for remote sensing. *Optics Express*, *31*(22), 36656. https://doi.org/10.1364/OE.500794

Lee, S., Kim, J., Hwang, J., Kim, W., Ko, K., Park, J., Song, G., Kim, D., Yun, H., & Cho, G. (2024). Preliminary Study of X-ray Ghost Imaging Reconstruction with a Deep Neural Network Constraint. *2024 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS), Medical Imaging Conference (MIC) and Room Temperature Semiconductor Detector Conference (RTSD)*, 1-2. https://doi.org/10.1109/NSS/MIC/RTSD57108.2024.10658246

Liu, H.-C., & Zhang, S. (2017). Computational ghost imaging of hot objects in long-wave infrared range. *Applied Physics Letters*, *111*(3), 031110. https://doi.org/10.1063/1.4994662

Liu, Q., Yin, L., Zhan, H., Lu, Y., Zhu, L., Long, X., & Wu, G. (2024). High-quality direct ghost imaging of random dynamic targets based on convolutional neural network. *Optics & Laser Technology*, *179*, 111290. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111290

Luesia, P., Crespo, M., Jarabo, A., & Redo-Sanchez, A. (2022). Non-line-of-sight imaging in the presence of scattering media using phasor fields. *Optics Letters*, *47*(15), 3796. https://doi.org/10.1364/OL.463296

Lyu, M., Wang, W., Wang, H., Wang, H., Li, G., Chen, N., & Situ, G. (2017). Deep-learning-based ghost imaging. *Scientific Reports*, *7*(1), 17865. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18171-7

Manion, G. N., & Stokkermans, T. J. (2025). Chromatic Aberration. Içinde *StatPearls*. StatPearls Publishing. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK597386/

Meyers, R., Deacon, K. S., & Shih, Y. (2008). Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons. *Physical Review A*, *77*(4), 041801. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.041801

Meyers, R. E., & Deacon, K. S. (2010). *Quantum ghost imaging experiments at ARL* (R. E. Meyers, Y. Shih, & K. S. Deacon, Ed.; s. 78150I). https://doi.org/10.1117/12.864270

Meyers, R. E., Deacon, K. S., & Shih, Y. (2008). *Quantum imaging of an obscured object by measurement of reflected photons* (R. E. Meyers, Y. Shih, & K. S. Deacon, Ed.; s. 70920E). https://doi.org/10.1117/12.797926

Ntziachristos, V. (2010). Going deeper than microscopy: The optical imaging frontier in biology. *Nature Methods*, *7*(8), 603-614. https://doi.org/10.1038/nmeth.1483

O'Toole, M., Lindell, D. B., & Wetzstein, G. (2018). Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform. *Nature*, *555*(7696), 338-341. https://doi.org/10.1038/nature25489

Padgett, M. J., & Boyd, R. W. (2017). An introduction to ghost imaging: Quantum and classical. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *375*(2099), 20160233. https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0233

Paniate, A., Massaro, G., Avella, A., Meda, A., Pepe, F. V., Genovese, M., D'Angelo, M., & Ruo-Berchera, I. (2024). Light-field ghost imaging. *Physical Review Applied*, *21*(2), 024032. https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.024032

Rizvi, S., Cao, J., Zhang, K., & Hao, Q. (2020). DeepGhost: Real-time computational ghost imaging via deep learning. *Scientific Reports*, *10*(1), 11400. https://doi.org/10.1038/s41598-020-68401-8

Rusev, D., Rusev, M., Stoyanov, S., & Tabakova-Komsalova, V. (2024). Imaging in a Smart Agriculture Platform. *2024 IEEE 12th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/IS61756.2024.10705167

Scarcelli, G., Berardi, V., & Shih, Y. (2006). Can Two-Photon Correlation of Chaotic Light Be Considered as Correlation of Intensity Fluctuations? *Physical Review Letters*, *96*(6), 063602. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.063602

Sharma, P., Brown, S., Walter, G., Santra, S., & Moudgil, B. (2006). Nanoparticles for bioimaging. *Advances in Colloid and Interface Science*, *123-126*, 471-485. https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.05.026

Shi, M., Cao, J., Cui, H., Zhou, C., & Zhao, T. (2023). Advances in Ghost Imaging of Moving Targets: A Review. *Biomimetics*, *8*(5), 435. https://doi.org/10.3390/biomimetics8050435

Shumigai, V. S., Oparin, E. N., Chernykh, A. V., Ismagilov, A. O., Petrov, N. V., Nasedkin, B. A., Kalinichev, A. A., & Tsypkin, A. N. (2024). Parallel multispectral ghost imaging data acquisition with supercontinuum. *Optics & Laser Technology*, *169*, 110135. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110135

Strekalov, D. V., Sergienko, A. V., Klyshko, D. N., & Shih, Y. H. (1995). Observation of Two-Photon "Ghost" Interference and Diffraction. *Physical Review Letters*, *74*(18), 3600-3603. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3600

Tan, W., Bai, Y., Huang, X., Zhu, X., Jiang, T., Zou, X., Nan, S., Liu, M., & Fu, X. (2023). Feeble-light ghost imaging via correlation calculation. *Results in Physics*, *54*, 107094. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107094

Tang, L., Bai, Y., Duan, C., Nan, S., Shen, Q., & Fu, X. (2018). Effects of incident angles on reflective ghost imaging through atmospheric turbulence. *Laser Physics*, *28*(1), 015201. https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa9624

Velten, A., Willwacher, T., Gupta, O., Veeraraghavan, A., Bawendi, M. G., & Raskar, R. (2012). Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging. *Nature Communications*, *3*(1), 745. https://doi.org/10.1038/ncomms1747

Wang, F., Wang, H., Wang, H., Li, G., & Situ, G. (2019). Learning from simulation: An end-to-end deep-learning approach for computational ghost imaging. *Optics Express*, *27*(18), 25560. https://doi.org/10.1364/OE.27.025560

Wang, Q., Mi, J.-S., Shi, H.-R., Bai, Z.-Q., Chen, L., Li, H.-T., Zhang, L.-L., & Zhao, Y. (2023). Ghost Imaging by Single-Layer Neural Network Based on Forward Physical Model. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *72*, 1-10. https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3295467

Wu, H., Wang, R., Zhao, G., Xiao, H., Liang, J., Wang, D., Tian, X., Cheng, L., & Zhang, X. (2020). Deep-learning denoising computational ghost imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, *134*, 106183. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106183

Xiang, M., Liu, F., Liu, J., Dong, X., Liu, Q., & Shao, X. (2024). Computational optical imaging: Challenges, opportunities, new trends, and emerging applications. *Frontiers in Imaging*, *3*. https://doi.org/10.3389/fimag.2024.1336829

Xiao, T., Zhai, X., Wu, X., Fan, J., & Zeng, G. (2023). Practical advantage of quantum machine learning in ghost imaging. *Communications Physics*, *6*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s42005-023-01290-1

Yang, F., Shalaginov, M. Y., Lin, H.-I., An, S., Agarwal, A. M., Zhang, H., Rivero-Baleine, C., Gu, T., & Hu, J. (2023). Wide field-of-view metalens: A tutorial. *Advanced Photonics*, *5*(3), 033001. https://doi.org/10.1117/1.AP.5.3.033001

Yin, J., Bai, Y., Zhou, L., Zhu, X., Zou, X., Zhou, Q., Huang, X., & Fu, X. (2025). Remote sensing ghost imaging based on Hadamard modulated Gaussian array beam. *Optics Communications*, *574*, 131108. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131108

Zhou, L., Bai, Y., Fu, Q., Huang, X., Zhu, X., Zou, X., & Fu, X. (2023). Imaging quality improvement of ghost imaging under high correlation coefficient between speckle patterns. *Optics Communications*, *545*, 129698. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129698

TRIANGLE ANTENNA ARRAY DESIGN FOR UNMANNED VEHICLE TECHNOLOGIES

Zafer YILDIRIM*

Department of Electrical-Electronic Engineering, Kayseri University, Graduate Education Institute, Kayseri Turkey
(Corresponding Author) ORCID: 0000-0003-3584-6770

Ali DURMUŞ

Department of Electrical-Electronic Engineering, Kayseri University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Kayseri Turkey - Türkiye, ORCID: 0000-0001-8283-8496

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are being used more and more in the defense sector for a variety of satellite-based missions and data collection. Effective communication requires the use of antenna arrays rather than single antennas, which makes antenna technology optimization more difficult because there are more parameters to consider. As a result, antenna array optimization widely uses artificial intelligence optimization techniques. The antenna array's initial state at a 2 GHz operating frequency showed a maximum gain of 14.8 dBi and a minimum gain of -29.8 dBi in a simulation run with MATLAB Antenna Designer. After optimization processes, the radiation pattern's distribution became more uniform as the maximum gain dropped to 7.6 dBi and the minimum gain dropped to -33.3 dBi. This result offers a notable benefit for multi-user scenarios and improves signal continuity in omnidirectional coverage areas.

Additionally, a significant improvement in energy consumption was achieved by lowering the antenna's output voltage from a peak value of 4 V to roughly 3.2 V. This decrease in power usage helps battery-powered systems run for longer periods of time. The obtained results show that, when taking into account both its energy performance and electromagnetic radiation efficiency, the antenna can be successfully used in low Earth orbit (LEO) satellite systems and unmanned vehicle technologies.

Keywords: Antenna Gain Optimization, Unmanned Vehicle Communication, Antenna Array, MATLAB.

VERİMLİ KANAL DİKKATİYLE DERİN KANAL YENİDEN KALİBRASYONU KULLANILARAK YOLOV11 VARYANTLARINDA GELİŞMİŞ SAR GEMİ TESPİTİ

Murat BAKIRCI

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

mbakirci@uislab.org, muratbakirci@tarsus.edu.tr (**Sorumlu Yazar**) ORCID: 0000-0003-2092-1168

İrem BAYRAKTAR

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

ibayraktar@uislab.org, irem_bayraktar@tarsus.edu.tr ORCID: 0009-0002-9049-7331

Özet

Deniz savunma ve gözetiminde, Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinde gemi tanıma, zorlu koşullarda deniz operasyonlarının, yasadışı operasyonların ve olası tehditlerin izlenmesine olanak sağladığı için önemlidir. Deniz alanı farkındalığı, sınır güvenliği ve ulusal güvenlik için, özellikle geleneksel optik sensörlerin etkisiz olduğu düşük görüş koşullarında doğru gemi tanıma hayati önem taşır. Savunmayla bağlantılı deniz faaliyetlerinde tespit doğruluğunu artırmak için, bu çalışma çeşitli model boyutlarında (YOLOv11n, YOLOv11s, YOLOv11m, YOLOv11l ve YOLOv11x) Verimli Kanal Dikkati (ECA) mekanizmasını entegre eder. ECA modülü, önemli kanal bazlı yanıtları dinamik olarak seçerek özellik çıkarımını iyileştirir ve karmaşık ve gürültülü SAR arka planlarında gemileri daha hassas bir şekilde tanımlamayı mümkün kılar. Otonom savunma sistemleri, filo takibi ve erken tehdit tanımlamanın tümü bu kapasiteye bağlıdır. En önemli iyileştirmeler, özellikle uydu gözetimi ve drone tabanlı keşif gibi gerçek zamanlı, kaynak kısıtlı savunma uygulamaları için çok uygun olan daha küçük model varyantlarında görülmektedir. SAR veri kümeleri üzerinde yapılan kapsamlı deneyler, ECA entegrasyonunun temel performans metriklerini sürekli olarak iyileştirdiğini göstermektedir. Isı haritası gösterimleri, ECA ile geliştirilmiş modellerin zorlu SAR durumlarında gemileri verimli bir şekilde vurguladığını ve tespit ettiğini, askeri ve sahil güvenlik operasyonlarındaki yararlılıklarını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, dikkat tabanlı mekanizmaların deniz savunma taktiklerini geliştirmedeki potansiyelini vurgulayarak, SAR tabanlı gemi tespit sistemlerinin çekişmeli alanlarda iyileştirilmiş durumsal farkındalık, erken uyarı sistemleri ve stratejik güvenlik izleme kabiliyetini güçlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), gemi tespiti, savunma sistemi, YOLOv11, Verimli Kanal Dikkati (ECA), derin öğrenme.

Giriş

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinde gemi tespiti, deniz gözetimi, güvenliği ve çevresel izleme için büyük önem taşır [1]. SAR'ın her türlü hava koşulunda, gündüz ve gece görüntüleme yetenekleri, onu özellikle optik görüş alanının sınırlı olduğu bölgelerdeki uygulamalar için uzaktan algılamada vazgeçilmez bir araç haline getirir. Bununla birlikte, SAR görüntülemeyi değerli kılan özellikler, yani bulutları delebilme ve doğal ışıktan bağımsız çalışabilme yeteneği, önemli zorluklar da ortaya çıkarır. SAR görüntüleri, gemiler gibi ilgi çekici özellikleri gizleyebilen ve otomatik tespit çabalarını zorlaştırabilen doğal gürültü, benek ve karmaşık geri saçılma etkileriyle karakterize edilir [2]. Son on yıllarda, SAR görüntülerinde gemi tespiti sorununu ele almak için çok sayıda metodoloji geliştirilmiştir. Geleneksel teknikler genellikle gemiler ile arka plandaki karmaşayı ayırt etmek için eşikleme, morfolojik işlemler veya istatistiksel modellere dayanıyordu [3]. Sabit Yanlış Alarm Oranı (CFAR) dedektörü [4] gibi erken yaklaşımlar, gemileri arka plandaki karmaşadan ayırt etmek için uyarlanabilir eşikleme kullanmıştır. Kontrollü ortamlarda etkili olsalar da, CFAR tabanlı yöntemler genellikle karmaşık deniz koşulları, değişken gemi boyutları ve güçlü parazitlenmeyle mücadele etmiş ve bu da gerçek dünya SAR veri kümelerine genelleştirilebilirliklerini sınırlamıştır. Benzer şekilde, morfolojik filtreleme ve kenar algılama tekniklerinden yararlanan model odaklı yaklaşımlar [5] bir miktar başarı göstermiş olsa da, görüntü gürültüsüne ve gemi yönelimindeki değişikliklere karşı doğal olarak hassastır. Bu yöntemler belirli koşullar altında etkili olabilse de, genellikle SAR verilerinin doğasında bulunan geniş değişkenliği ele almak için gereken sağlamlık ve uyarlanabilirlikten yoksundurlar.

Derin öğrenmenin hızla ilerlemesiyle birlikte, veri odaklı metodolojiler geleneksel tekniklerin yerini büyük ölçüde almış ve SAR tabanlı gemi tespitinde üstün genelleme ve sağlamlık sunmuştur. Evrişimli Sinir Ağları (CNN'ler), modellerin hiyerarşik özellik temsillerini doğrudan ham verilerden öğrenmesini sağlayarak bu paradigma değişiminde önemli bir rol oynamıştır [6]. İlk derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, SAR görüntülerinde gemileri sınıflandırmak ve yerelleştirmek için AlexNet ve VGG [7] gibi standart CNN mimarilerini kullanmıştır. Ancak bu modeller genellikle kapsamlı ön ve son işlem adımları gerektirdiğinden, gerçek zamanlı uygulamalar için hesaplama açısından verimsiz hale gelmiştir. Faster R-CNN [8] gibi bölge tabanlı nesne tespit çerçevelerinin tanıtılması, aday nesneleri belirlemek için bölge öneri ağlarından (RPN'ler) yararlanarak tespit doğruluğunu daha da artırmış, ancak bu yaklaşımlar nispeten yavaş çıkarım hızlarından muzdarip olmuştur. Tek aşamalı dedektörler, özellikle YOLO ailesine dayalı olanlar, yüksek hızlı nesne tespiti için lider bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmalar, küçük nesne tespitini geliştirmeyi ve görüntü eserlerine karşı dayanıklılığı iyileştirmeyi amaçlayan değişikliklerle, SAR gemi tespitinde YOLO tabanlı modellerin etkinliğini göstermiştir [9].

YOLOv11 çerçevesi, zorlu görüntüleme senaryolarında nesne algılama görevleri için çok yönlü bir platform sağlamak üzere tasarlanmış, bu aile içinde yeni bir yinelemeyi temsil eder. YOLOv11'in mimarisi, CNN'lerdeki gelişmeleri bünyesine katarak ve bunları gerçek zamanlı uygulamalar için optimize ederek önceki YOLO modellerinin başarıları üzerine inşa edilmiştir. Güçlü performansına rağmen, standart YOLOv11 çerçevesi kullanılarak SAR görüntülerinde gemi tespiti, verilerin karmaşık ve gürültülü yapısı nedeniyle hala engellenebilir [10]. Zorluklar, düşük sinyal-gürültü oranından ve benek varlığından, ayrıca gemi boyutlarındaki,

yönelimlerindeki ve SAR sahnelerinde karşılaşılan çeşitli arka plan karmaşasından kaynaklanmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, son araştırmalar giderek artan bir şekilde dikkat mekanizmalarının derin öğrenme mimarilerine entegrasyonuna odaklanmıştır. Dikkat mekanizmaları, bir görüntünün en bilgilendirici kısımlarına seçici olarak odaklanarak insan görsel sistemini taklit etmeyi ve böylece özellik çıkarımını ve algılama doğruluğunu iyileştirmeyi amaçlamaktadır [11]. Görme Dönüştürücülerinde (ViT'ler) [12]

kullanılanlar gibi öz-dikkat mekanizmaları, çeşitli bilgisayarlı görme görevlerinde önemli iyileştirmeler göstermiştir, ancak ikinci dereceden hesaplama karmaşıklıkları, kaynak kısıtlı ortamlarda dağıtım için zorluklar yaratmaktadır. Buna karşılık, kanal dikkat mekanizmaları, aşırı hesaplama yükü oluşturmadan özellik haritalarını uyarlamalı olarak yeniden ağırlıklandırarak hafif bir alternatif sunmaktadır. Çeşitli dikkat mekanizmaları arasında, kanal dikkati, CNN'ler tarafından öğrenilen özellik temsillerini iyileştirmede özellikle etkili olduğu kanıtlanmıştır [13]. Her özellik kanalının önemini uyarlamalı olarak yeniden ağırlıklandırarak, kanal dikkat modülleri, ağın daha az bilgilendirici olanları bastırırken öne çıkan özellikleri önceliklendirmesini sağlar.

Bu bağlamda, Verimli Kanal Dikkati (ECA) mekanizması [14] önemli bir ilgi görmüştür. Genellikle karmaşık işlemlere veya boyut azaltımına dayanan geleneksel kanal dikkat modüllerinin aksine, ECA bu olası darboğazları önleyen hafif bir yaklaşım sunar. ECA, boyut azaltımı olmadan kanal bazında özellik ağırlıklandırmasını iyileştirerek temel bilgilerin korunmasını sağlar. Küresel havuzlama ve tamamen bağlı katmanlar aracılığıyla ek karmaşıklık getiren Sıkıştırma ve Uyarım (SE) bloğu [15] gibi geleneksel dikkat modüllerinin aksine, ECA yerel bir kanallar arası etkileşim stratejisi kullanır ve bu da onu gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça verimli hale getirir. Boyutsallık azaltması olmadan yerel bir kanallar arası etkileşim stratejisi kullanan ECA, minimum hesaplama yüküyle temel kanal bağımlılıklarını yakalayabilir. Bu, onu SAR görüntüleri kullanan deniz gözetimi gibi gerçek zamanlı performansın kritik olduğu uygulamalar için özellikle uygun hale getirir [16]. Çeşitli çalışmalar, ECA'nın görüntü sınıflandırması ve nesne tespiti gibi görevler için CNN tabanlı mimarilere entegrasyonunu araştırmış ve gelişmiş özellik ayrımcılığı ve gürültülü girdilere karşı gelişmiş dayanıklılık göstermiştir [17]. Ancak, özellikle YOLO çerçevesinde, ECA'nın SAR gemi tespitindeki etkisi üzerine sınırlı araştırma yapılmıştır. Bu çalışmanın arkasındaki motivasyon, SAR görüntülerinde gemi tespit performansını artırmak için ECA mekanizmasının YOLOv11 çerçevesine entegre edilmesinin potansiyelini araştırmaktır. Çalışmamız, ECA'nın eklenmesinin farklı karmaşıklık seviyelerindeki modelleri nasıl etkilediğini değerlendirmek için en küçüğünden (YOLOv11n) en büyüğüne (YOLOv11x) kadar uzanan beş YOLOv11 algoritması varyantını incelemektedir. Temel YOLOv11 modellerini ECA ile zenginleştirerek, geliştirilmiş modellerin gemi özelliklerine karşı daha iyi bir hassasiyet sergileyeceğini ve böylece özellikle gemi izlerinin gürültü nedeniyle belirsiz veya kısmen gizlenmiş olduğu durumlarda daha yüksek tespit doğruluğu sağlayacağını varsayıyoruz.

Önerilen entegrasyon, SAR tabanlı gemi tespitindeki bazı temel zorlukları ele almak üzere tasarlanmıştır. İlk olarak, SAR görüntüleri genellikle hedef özelliklerini gizleyebilen önemli benek gürültüsü içerir. ECA modülü, gemi varlığını daha iyi gösteren kanalları vurgulayarak özellik haritalarını geliştirir ve gürültünün ve arka plan karmaşasının etkisini etkili bir şekilde azaltır. İkinci olarak, gemi boyutlarındaki ve yönelimlerindeki çeşitlilik, çeşitli mekansal

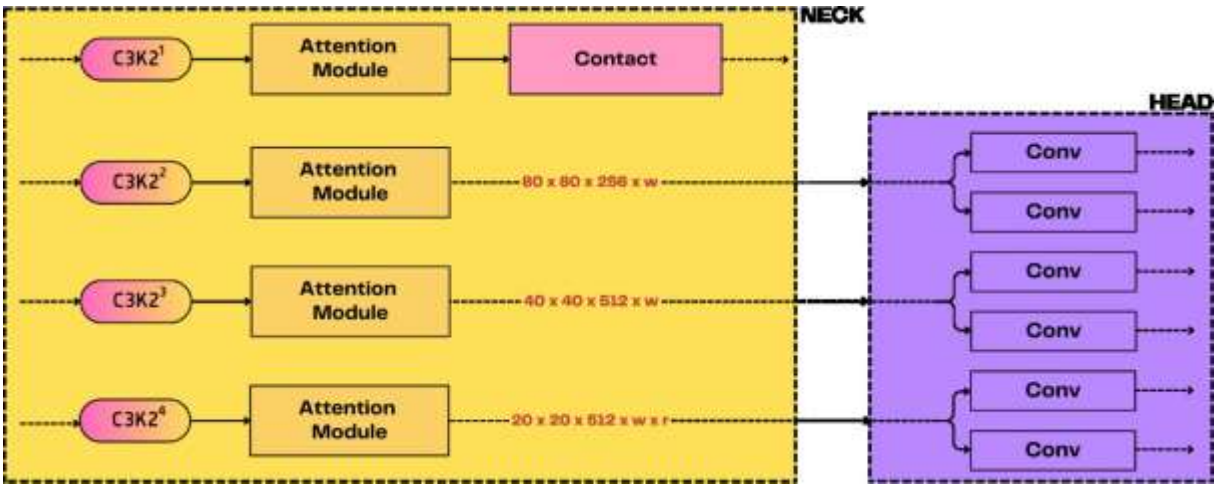
ölçeklere ve perspektiflere uyum sağlayabilen bir tespit sistemi gerektirir. Özellik çıkarma sürecini iyileştirerek ECA, gemilerin çok ölçekli özelliklerinin yakalanmasına yardımcı olur ve böylece farklı model varyantları arasında daha sağlam bir tespit sağlar. Üçüncüsü, daha büyük modeller doğası gereği daha yüksek temsil kapasitesine sahip olsa da, azalan getiriler nedeniyle bazen özellik temsilindeki küçük iyileştirmelere daha az duyarlı olabilirler. Buna karşılık, genellikle düşük kapasiteleriyle sınırlı olan daha küçük modeller, özellik çıkarmadaki herhangi bir iyileştirmeden önemli ölçüde faydalanabilir. Çalışmamız, standart ve ECA destekli YOLOv11 varyantlarının performansını sistematik olarak karşılaştırarak bu etkileri ölçmeyi amaçlamaktadır. Çalışmamız, hassasiyet, geri çağırma, ortalama Ortalama Hassasiyet (mAP) ve F1 puanı gibi nicel performans metriklerine ek olarak bir dizi nitel analiz de içermektedir. Isı haritaları ve tespit karşılaştırmaları biçimindeki görselleştirmeler, ECA mekanizmasının SAR görüntülerindeki gemi özelliklerini vurgulama becerisine dair somut kanıtlar sunmaktadır. Örneğin, ısı haritası görselleştirmeleri, ECA modülünün gemilere karşılık gelen bölgeleri güçlendirdiğini ve böylece bu nesnelerin karmaşık SAR arka planına karşı netliğini artırdığını açıkça göstermektedir. Benzer şekilde, başlangıç ve ECA destekli modellerden elde edilen tespit çıktılarının yan yana karşılaştırılması, dikkat mekanizmasının sağladığı pratik iyileştirmeleri daha da vurgulamaktadır.

Metod

Bu çalışma, SAR görüntülerinde gemi tespiti için Verimli Kanal Dikkati (ECA) mekanizmasının YOLOv11 çerçevesine entegre edilmesinin etkisini araştırmaktadır. Metodoloji, veri seti ön işleme, model mimarisi değişiklikleri, eğitim ve değerlendirme dahil olmak üzere birden fazla aşamadan oluşmaktadır. ECA'yı YOLOv11 varyantlarına dahil ederek, kanal bazında özellik yeniden kalibrasyonunun farklı karmaşıklıktaki modeller arasında tespit performansını nasıl etkilediğini değerlendirmeyi amaçlıyoruz. Kapsamlı bir analiz elde etmek için, performansı standart nesne tespit metrikleri, hassasiyet, geri çağırma, ortalama Ortalama Hassasiyet (mAP) ve F1 puanı temelinde değerlendiriyoruz ve performans farklılıklarının istatistiksel anlamlılığını doğruluyoruz. SAR görüntüleri, görünür ışık yerine mikrodalga sinyallerine dayanan farklı görüntüleme mekanizmaları nedeniyle geleneksel optik görüntülerden farklıdır. Bu durum, benek gürültüsü, değişken geri saçılma ve güçlü dağınıklık girişimi gibi benzersiz zorluklarla sonuçlanmaktadır. Sağlam bir model performansı sağlamak için, veri seti ön işleme bu etkileri azaltmada önemli bir rol oynar. Bu çalışmada kullanılan veri kümesi, çeşitli deniz koşullarında çekilmiş, farklı boyut ve yönlere sahip gemileri içeren SAR görüntülerinden oluşmaktadır. Görüntüler, gemilerin açıkça ayırt edilebildiği yüksek çözünürlüklü verilerin yanı sıra, gemi tespitinin gürültü ve karışıklık nedeniyle daha zor olduğu düşük çözünürlüklü örnekler de içermektedir. SAR görüntülerini derin öğrenmeye dayalı tespit için optimize etmek amacıyla, önemli gemi özelliklerini korurken benek gürültüsünü bastırmak için çoklu bakış filtreleme tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, görüntü kontrastını iyileştirmek ve gemileri arka plana göre vurgulamak için uyarlamalı histogram eşitleme uygulanmıştır. Piksel yoğunlukları, kararlı eğitimi ve yakınsamayı kolaylaştırmak için [0,1] aralığına normalleştirilmiştir. Ayrıca, model genellemesini iyileştirmek için rastgele döndürme, çevirme ve ölçekleme dahil olmak üzere bir dizi iyileştirme uygulanmıştır. Etiketlemedeki hatalar eğitim performansını önemli ölçüde

etkileyebileceğinden, doğru sınırlayıcı kutu yerleşimlerini sağlamak için yer gerçeği açıklamaları incelenmiştir. Ön işleme tabi tutulmuş görüntüler daha sonra, doğrudan performans karşılaştırmalarına olanak sağlamak amacıyla hem ECA modülüyle hem de modülsüz YOLOv11 varyantlarının eğitimi için girdi olarak kullanılmıştır.

YOLOv11 nesne algılama çerçevesi, gerçek zamanlı uygulamalardaki hızı ve doğruluğu nedeniyle çalışmamızın omurgasını oluşturmaktadır. YOLOv11, tek atış algılama paradigmasını takip eder, yani tek bir ileri geçişte sınırlayıcı kutuları ve sınıf olasılıklarını tahmin eder ve bu da onu büyük ölçekli SAR görüntülerinde gemi tespiti için oldukça verimli hale getirir. Çalışma, her biri model kapasitesi ve hesaplama karmaşıklığı bakımından farklılık gösteren beş YOLOv11 varyantını, YOLOv11n, YOLOvv11s, YOLOv11m, YOLOv11l ve YOLOv11x'i değerlendirir. YOLOv11n ve YOLOv11s, kaynakları kısıtlı cihazlarda dağıtım için optimize edilmiş hafif modellerdir; YOLOv11m, YOLOv11l ve YOLOv11x ise daha fazla özellik çıkarma yeteneğine sahip giderek daha derin mimarilere sahiptir. YOLOv11'in özellik çıkarma yeteneğini artırmak için mimariye Verimli Kanal Dikkati (ECA) modülü entegre edilmiştir. ECA, aşırı hesaplama yükü oluşturmadan kanal bazında özellik temsillerini iyileştirmek için tasarlanmış hafif bir dikkat mekanizmasıdır. ECA, gemi özelliklerini tespit etmedeki önemine göre her kanalı uyarlanabilir bir şekilde yeniden ağırlıklandırır. Tamamen bağlı katmanlar aracılığıyla boyutluluğu azaltan Sıkıştırma ve Uyarım (SE) modülü gibi geleneksel dikkat mekanizmalarının aksine, ECA daha verimli bir kanallar arası etkileşim yaklaşımı kullanır. Küresel bağımlılıkları öğrenmek yerine, ECA komşu kanallar arasındaki etkileşimleri yakalamak için 1 boyutlu bir evrişimsel çekirdek uygular ve önemli özelliklerin belirli kalıplara aşırı uyum sağlamadan vurgulanmasını sağlar. İnce ayrıntıları bulanıklaştırabilen mekansal dikkat mekanizmalarının aksine, ECA mekansal özellik haritalarının bütünlüğünü korurken en alakalı kanalları seçici olarak geliştirir. ECA modülü, Şekil 1'de gösterildiği gibi, bölge önerisi ve nesne sınıflandırmasından önce kanal aktivasyonlarını iyileştirmek için YOLOv11'in boyun kısmına entegre edilmiştir. Bu geliştirme, ağın zorlu SAR ortamlarında bile gemi özelliklerine daha etkili bir şekilde odaklanmasını sağlar.

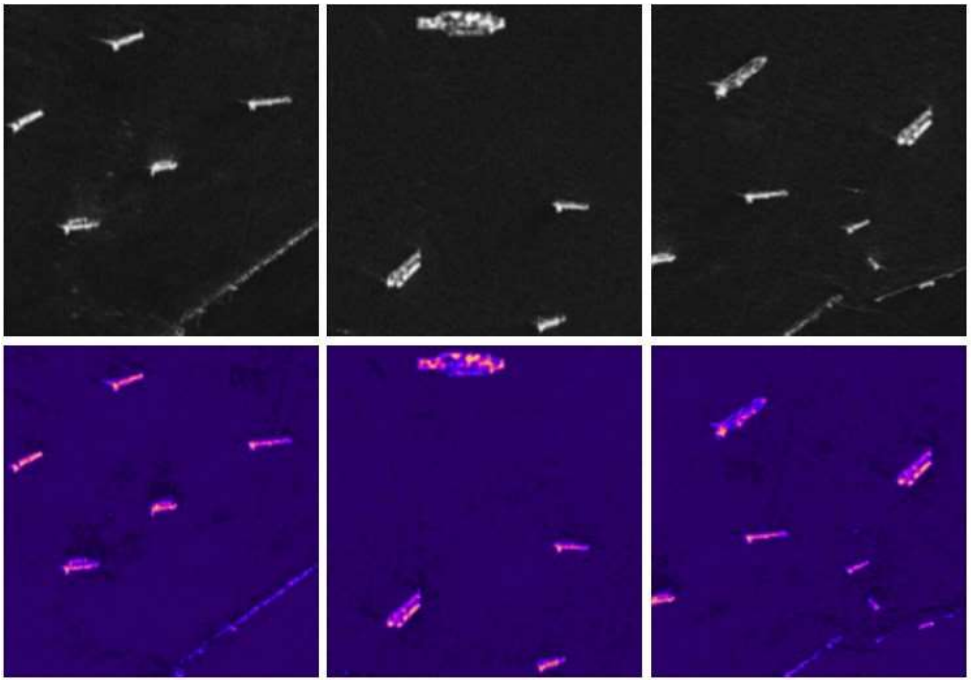


Şekil 1. Gelişmiş özellik iyileştirmesi ve iyileştirilmiş nesne tespiti için ECA mekanizmasının YOLOv11 mimarisinin Boyun bölümüne entegrasyonu.

Eğitim süreci, etiketli SAR gemi tespit veri kümeleriyle gözetimli öğrenme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirildi. Modeller, doğrudan karşılaştırmaları kolaylaştırmak için ECA modülüyle ve ECA modülü olmadan eğitildi. Tespit doğruluğunu optimize etmek için yerelleştirme kaybı (sınırlayıcı kutu regresyonu), sınıflandırma kaybı (gemi varlığı için çapraz entropi) ve güven kaybının (nesnelik puanı) bir kombinasyonu kullanıldı. Yakınsama kararlılığını artırmak için momentumlu Stokastik Gradyan İnişi (SGD) kullanıldı. Öğrenme hızı 0,001'de başlatıldı ve bir kosinüs bozunma çizelgesi kullanılarak dinamik olarak ayarlandı. Modeller, hesaplama verimliliğini yakınsama kararlılığıyla dengelemek için 16'lık bir parti boyutu ile 150 dönem için eğitildi. Tespit doğruluğunu artırmak için gemi sınırlayıcı kutu dağılımlarında k-ortalamalar kümeleme kullanılarak optimize edilmiş çapa kutusu boyutları oluşturuldu. Tespit performansını nicel olarak değerlendirmek için, hassasiyet, geri çağırma, mAP ve F1 puanı dahil olmak üzere temel performans ölçütleri her YOLOv11 varyantı için hesaplandı. Dikkat tabanlı özellik iyileştirmenin etkinliğini değerlendirmek için standart YOLOv11 ve ECA ile geliştirilmiş YOLOv11 modelleri arasında karşılaştırmalar yapıldı.

Bulgular

Şekil 2, örnek görüntülerin görüntülenmesiyle ECA mekanizmasının özellik çıkarımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Üst satırda, her biri farklı koşullar altında gemileri içeren ve kullanılan veri setinin temsili örnekleri olarak hizmet veren dört farklı SAR görüntüsü sunulmaktadır. Her SAR görüntüsünün hemen altında, ilgili ısı haritası alt satırda gösterilmektedir. Isı haritaları, ECA destekli YOLOv11 varyantı tarafından oluşturulur ve özellik aktivasyonlarının yoğunluğunu belirtmek için bir renk gradyanı kullanır. Orijinal SAR görüntüleri ile ısı haritaları arasındaki belirgin kontrast, ECA modülünün gemi özelliklerine karşılık gelen kanalları etkili bir şekilde güçlendirerek, bunları SAR görüntülerinin karmaşık arka planına karşı daha belirgin hale getirdiğini açıkça göstermektedir. Kritik bölgelere bu şekilde odaklanılması, ECA'nın uzamsal-kanal etkileşimlerini iyileştirme yeteneğinin doğrudan bir sonucudur ve böylece ince veya kısmen örtülü gemi özelliklerinin bile daha güvenilir bir şekilde yakalanmasını sağlar. Bu görsel kanıt, ECA mekanizmasının özellik çıkarma aşamasından itibaren daha sağlam ve doğru bir tespit sürecini kolaylaştırdığını doğrulayarak, sonraki nicel analizlerin temelini oluşturur.



Şekil 2. SAR gemi görüntülerinde ECA destekli özellik çıkarımının görselleştirilmesi. Üst satırda gemileri içeren dört temsili SAR görüntüsü, alt satırda ise ECA destekli YOLOv11 modeli tarafından üretilen ilgili ısı haritaları gösterilmektedir. Isı haritalarında gemilerin net bir şekilde sınırlandırılması, ECA modülünün kanal tepkilerini görüntülerdeki kritik bölgeleri vurgulamak için etkili bir şekilde iyileştirdiğini doğrulamaktadır. Geliştirilmiş özellik çıkarımı, mekanizmanın, özellikle hassas gemi tanımlaması için küçük farklılıkların bile kritik olabileceği zorlu SAR ortamlarında tespit performansını iyileştirme yeteneğini göstermektedir.

Tüm YOLOv11 varyantlarıyla gerçekleştirilen testlerin performans sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir. Sonuçlar, ECA mekanizmasının YOLOv11 mimarisine entegre edilmesinin, SAR görüntülerine uygulandığında tüm model varyantlarında gemi tespit performansını tutarlı bir şekilde artırdığını göstermektedir. İyileşme, tüm değerlendirme metriklerinde belirgindir. Bu iyileştirme, ECA artışının önemli performans kazanımlarına yol açtığı YOLOv11n ve YOLOv11s gibi daha küçük model varyantlarında özellikle belirgindir. YOLOv11n için ECA'nın dahil edilmesi, hassasiyette 0,541'den 0,654'e, geri çağırmada 0,653'ten 0,721'e, mAP'de 0,572'den 0,683'e ve F1 puanında 0,591'den 0,685'e bir artışla sonuçlanmaktadır. Bu, ECA mekanizmasının, modelin en küçük varyantının ilgili özellik temsillerini daha iyi yakalamasına yardımcı olduğunu, böylece yanlış pozitifleri azalttığını ve genel tespit doğruluğunu iyileştirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde, YOLOv11'ler için ECA artırma, hassasiyeti 0,690'dan 0,774'e, geri çağırmayı 0,744'ten 0,773'e, mAP'yi 0,711'den 0,755'e ve F1 puanını 0,716'dan 0,773'e yükseltmektedir. Daha küçük YOLOv11 varyantları, ECA mekanizmasından büyük ölçüde yararlanıyor; bu durum muhtemelen, hesaplama yükünü önemli ölçüde artırmadan özellik haritalarını iyileştirme ve mekansal-kanal etkileşimlerini geliştirme yeteneğinden kaynaklanıyor.

Orta büyüklükteki YOLOv11m için, ECA ile geliştirilmiş model de belirgin bir iyileşme gösteriyor; hassasiyet 0,805'ten 0,857'ye, geri çağırma 0,809'dan 0,829'a, mAP 0,780'den 0,818'e ve F1 puanı 0,807'den 0,843'e çıkıyor. ECA'nın etkisi, temel performansların zaten

yüksek olduğu YOLOv11l ve YOLOv11x gibi daha büyük modellerde biraz azalıyor. Bununla birlikte, hala iyileşmeler gözlemleniyor: ECA'lı YOLOv11l 0,902 hassasiyete (0,881'e kıyasla), geri çağırma 0,872'ye (0,857'ye kıyasla), mAP 0,866'ya (0,834'e kıyasla) ve F1 puanı 0,888'e (0,869'a kıyasla) ulaşıyor. Benzer şekilde, YOLOv11x için hassasiyet 0,933'ten 0,946'ya, geri çağırma 0,909'dan 0,922'ye, mAP 0,913'ten 0,925'e ve F1 puanı 0,921'den 0,934'e yükselmiştir. Bu performans değerleri, daha büyük modellerin zaten yüksek tespit yetenekleri göstermesine rağmen, ECA'nın özellik çıkarma ve sınıflandırma performansında anlamlı iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, ECA artırmanın SAR görüntülerinde gemi tespiti için YOLOv11 çerçevesini sistematik olarak geliştirdiğini göstermektedir. En büyük göreceli iyileştirmeler, özellik gösteriminin doğası gereği kısıtlı olduğu daha küçük modellerde gözlemlenmiştir ve bu da dikkat mekanizmasının hafif mimarileri optimize etmede kritik bir rol oynadığını düşündürmektedir. Kazanımlar model karmaşıklığı arttıkça azalsa da, tüm varyantlardaki hassasiyet ve geri çağırmadaki iyileştirmeler, ECA'nın tespit sağlamlığını iyileştirmedeki etkinliğini doğrulamaktadır.

Tablo 1. ECA destekli ve desteksiz YOLOv11 varyantları için performans metrikleri. Her model için, hem temel performans hem de ECA modülünün entegrasyonuyla elde edilen gelişmiş performans raporlanmıştır. ECA'nın dahil edilmesi, tüm varyantlarda tespit doğruluğunu sürekli olarak artırmakta olup, en belirgin iyileştirmeler daha küçük modellerde (YO LOv11n ve YOLOv11s) gözlemlenmiştir.

	Performans Metrikleri			
Model	P	R	mAP	F1-Skoru
YOLOv11n	0.541	0.653	0.572	0.591
YOLOv11n + ECA	0.654	0.721	0.683	0.685
YOLOv11s	0.690	0.744	0.711	0.716
YOLOv11s + ECA	0.774	0.773	0.755	0.773
YOLOv11m	0.805	0.809	0.780	0.807
YOLOv11m + ECA	0.857	0.829	0.818	0.843
YOLOv11l	0.881	0.857	0.834	0.869
YOLOv11l + ECA	0.902	0.872	0.866	0.888
YOLOv11x	0.933	0.909	0.913	0.921
YOLOv11x + ECA	0.946	0.922	0.925	0.934

Sonuç

Bu çalışma, SAR görüntülerinde gemi tespiti için Verimli Kanal Dikkati (ECA) mekanizmasının çeşitli YOLOv11 model varyantlarına entegre edilmesinin etkisini sistematik olarak araştırmıştır. Hem nicel metrikler hem de nitel görselleştirmelerle desteklenen deneysel sonuçlar, ECA modülünün dahil edilmesinin tüm model boyutlarında tespit performansında

tutarlı iyileştirmelere yol açtığını göstermektedir. Özellikle, YOLOv11n ve YOLOv11s gibi daha küçük varyantlar hassasiyet, geri çağırma, mAP ve F1 puanında önemli kazanımlar sergilemiş ve hafif mimarilerde rafine edilmiş özellik çıkarımının önemini vurgulamıştır. Buna karşılık, YOLOv11l ve YOLOv11x gibi daha büyük modeller zaten yüksek temel performans gösterirken, ECA'nın dahil edilmesi gemi özelliklerinin karmaşık arka planlardan ayırt edilmesini daha da artırarak marjinal iyileştirmelere katkıda bulunmaktadır. Sonuçlar, ECA ile geliştirilmiş ısı haritalarının SAR görüntülerinde gemi özelliklerini etkili bir şekilde vurguladığını ve dikkat mekanizmasının belirgin alanları güçlü bir şekilde vurguladığını doğrulamıştır. Bulgular, ECA modülünün YOLOv11 çerçevesini geliştirmedeki teknik etkinliğini doğruluyor ve zorlu SAR görüntüleme koşullarında gemi tespitini iyileştirmedeki pratik faydalarını vurguluyor. Gelecekteki çalışmalar, dikkat mekanizmalarının daha da geliştirilmesini, tamamlayıcı tekniklerle entegrasyonunu ve çeşitli uzaktan algılama senaryolarında daha geniş uygulamaları araştırabilir.

References

1. Lv, N., Chen, C., Qiu, T., Sangaiah, A.K.: Deep Learning and Superpixel Feature Extraction Based on Contractive Autoencoder for Change Detection in SAR Images. IEEE Transactions on Industrial Informatics 14(12), 530-5538 (2018).

2. Wang, J., Zheng, T., Lei, P., Bai, X.: Ground Target Classification in Noisy SAR Images Using Convolutional Neural Networks. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 11(11), 4180-4192 (2018).

3. Wang, X., Li, G., Zhang, X.P., He, Y.: Ship Detection in SAR Images via Local Contrast of Fisher Vectors. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 58(9), 64676479 (2020).

4. Patel, V., Madhukar, H., Ravichandran, S.: Variability index constant false alarm rate for marine target detection In: 2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), Vijayawada, India, 2018, pp. 171-175.

5. Xu, H., Xiao, S., Li, Z., Wang, S., Liu, W., Li, J.: A Novel SAR Imaging Method Based on Morphological Component Analysis. IEEE Sensors Journal 22(13), 13326-13337 (2022).

6. Zhang, M., Li, W., Du, Q.: Diverse Region-Based CNN for Hyperspectral Image Classification. IEEE Transactions on Image Processing 27(6), 2623-2634 (2018).

7. Mehran, A., Tehsin, S., Hamza, M.: An effective deep learning model for ship detection from satellite images. Spatial Information Research 31, 61–72 (2023).

8. Cao, C. et al.: An Improved Faster R-CNN for Small Object Detection. IEEE Access 7, 106838-106846 (2019).

9. Tan, X., Leng, X., Luo, R., Sun, Z., Ji, K., Kuang, G.: YOLO-RC: SAR Ship Detection Guided by Characteristics of Range-Compressed Domain. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 17, 18834-18851 (2024).

10. Bakirci, M., Bayraktar, I.: Assessment of YOLO11 for Ship Detection in SAR Imagery Under Open Ocean and Coastal Challenges. In: 2024 21st International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), Mexico City, Mexico, 2024,

pp. 1-6.

11. Brauwers, G., Frasincar, F.: A General Survey on Attention Mechanisms in Deep Learning. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 35(4), 3279-3298 (2023).

12. Wang, L., Fang, S., Meng, X., Li, R.: Building Extraction With Vision Transformer. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 60, 1-11 (2022).

13. Tong, W., Chen, W., Han, W., Li, X., Wang, L.: Channel-Attention-Based DenseNet Network for Remote Sensing Image Scene Classification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 13, 4121-4132 (2020).

14. Wang, Q., Wu, B., Zhu, P., Li, P., Zuo, W., Hu, Q.: ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 11534-11542.

15. Hu, J., Shen, L., Sun, G.: Squeeze-and-Excitation Networks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018, pp. 7132-7141.

16. Achiri, L., Guida, R., Iervolino, P.: SAR and AIS Fusion for Maritime Surveillance. In: 2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI), Palermo, Italy, 2018, pp. 1-4.

17. Wang, H., Zhu, H., Li, H.: A Rotating Machinery Fault Diagnosis Method Based on Multi Sensor Fusion and ECA-CNN. IEEE Access 11, 106443-106455 (2023).

YOLOV11 İLE HAVA SAHASI GÜVENLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ: SAVUNMA SİSTEMLERİ İÇİN BİR İHA ALGILAMA ÇERÇEVESİ

İrem BAYRAKTAR

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

ibayraktar@uislab.org, irem_bayraktar@tarsus.edu.tr (**Sorumlu Yazar**) ORCID: 0009-0002-9049-7331

Murat BAKIRCI

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, Türkiye

mbakirci@uislab.org, muratbakirci@tarsus.edu.tr ORCID: 0000-0003-2092-1168

Özet

Bu çalışmada, İHA'ya monte edilmiş bir kamera tarafından çekilen fotoğraflardan insansız hava araçlarını (İHA) tespit etmede YOLOv11 algoritmasının etkinliği değerlendirilmiş ve performansı YOLOv10 ve YOLOv9 gibi önceki yinelemelerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan veri setine hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı İHA fotoğrafları dahil edilmiştir ve bu da çeşitli İHA konfigürasyonlarında tespit performansının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Sabit kanatlı İHA'lar için sırasıyla 0,854, 0,861, 0,926 ve 0,857 ve döner kanatlı İHA'lar için sırasıyla 0,925, 0,901, 0,904 ve 0,913 hassasiyet, geri çağırma, ortalama hassasiyet (mAP) ve F1 puanlarıyla YOLOv11 rakiplerini geride bırakmıştır. Bulgular, özellikle değişen İHA yapılandırmalarına yanıt olarak yüksek hassasiyet ve esneklik gerektiren durumlarda YOLOv11'in gelişmiş tespit yeteneklerini göstermektedir. YOLOv9, döner kanatlı İHA'ları tanımada üstün performans gösterirken, YOLOv11'in tutarlı performansına ulaşamamıştır. Buna karşılık, önceki YOLO sürümleri daha düşük performans ölçütleri göstermiş ve YOLOv10, sabit kanatlı İHA'ları tespit etmede belirli sorunlar göstermiştir. Sonuçlar, YOLOv11'in tespit doğruluğu ve güvenilirlik arasında güçlü bir denge sağladığı için İHA tespit işleri için mükemmel bir araç olduğunu göstermektedir. Karmaşık durumlarda gerçek zamanlı tespit ve izleme için çıkarımlarla birlikte çalışma, YOLOv11'in hava sahası kontrolü, hava gözetimi ve İHA faaliyet izleme alanlarında faydalı uygulamalar için potansiyelini vurgulamaktadır. YOLOv11'in pratik durumlardaki kullanışlılığı, derin öğrenmeye dayalı nesne tespit algoritmalarının geliştirilmesi ve İHA tespit sistemlerinin iyileştirilmesindeki hayati önemleri hakkında da bilgilendirici bilgiler sağlayan bu çalışma tarafından doğrulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İHA tespiti, hava savunma sistemi, YOLO, hava gözetlemesi, sabit kanatlı ve döner kanatlı İHA'lar, derin öğrenme tabanlı nesne tespiti.

Giriş

Hava gözetleme ve izleme operasyonlarında, insansız hava araçlarının (İHA) tespiti, güvenlik, trafik yönetimi ve hava sahasının etkili bir şekilde düzenlenmesi açısından kritik öneme sahiptir [1]. Çeşitli ortamlarda faaliyet gösteren İHA sayısının artmasıyla birlikte, bunların doğru bir şekilde tespit edilmesi, riskleri azaltmak ve operasyonel verimliliği artırmak için elzem hale gelmiştir. Havada İHA tespiti, hava operasyonlarının emniyetini ve güvenilirliğini sağladığı için hem ticari hem de askeri uygulamalarda önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Örneğin, kalabalık hava sahalarında İHA tespiti, çarpışma risklerini azaltmak ve hava sahası yönetimini iyileştirmek için hayati önem taşımaktadır [2]. Ayrıca, yetkisiz İHA faaliyetlerinin tespiti, kritik altyapı, kamu binaları ve kamu etkinlikleri gibi hassas alanların

korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu yetenekler, yalnızca potansiyel tehditleri ele almak için değil, aynı zamanda İHA'ların mevcut hava sahası sistemlerine sorunsuz bir şekilde entegre edilmesini sağlamak için de önemlidir. Sonuç olarak, İHA tespiti için etkili ve son derece hassas yöntemlerin geliştirilmesi giderek önem kazanmakta ve bu da onu modern hava teknolojilerinde önemli bir araştırma alanı haline getirmektedir.

İHA'lar, çok yönlü uygulamaları sayesinde modern teknolojinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir [3]. Bu hava platformları, gözetleme, haritalama, tarım, çevresel izleme ve lojistik dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı veri sağlama ve ulaşılması zor alanlara erişim kabiliyetleri, onları birçok alanda vazgeçilmez kılmaktadır. Örneğin, akıllı şehirlerde İHA'lar hava kalitesi değerlendirmeleri ve hava kirleticilerinin hassas ölçümleri için kullanılmaktadır [4]. Akıllı trafik yönetiminde İHA'lar, hızlı durumsal farkındalık sağlayarak, hızlı müdahalelere olanak tanıyarak ve müdahale sürelerini iyileştirerek akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır [5]. Benzer şekilde, çevresel izlemede İHA'lar ormansızlaşmayı, yaban hayatını ve iklim değişikliğini izlemede etkilidir. İHA teknolojisinin maliyet etkinliği ve esnekliği, çeşitli sektörlerde benimsenmesini daha da artırmıştır. İnsan müdahalesini en aza indirerek ve veri toplama süreçlerini hızlandırarak, İHA'lar geleneksel yöntemlerin pratik olmadığı veya maliyetli olduğu zorlu coğrafyalarda özellikle etkili olduklarını kanıtlamıştır [6]. Bu avantajlar, İHA'ları modern hava gözetimi ve veri toplama operasyonlarında temel araçlar haline getirerek çeşitli yeniliklere yol açmıştır [7].

Son yıllarda, nesne tespit algoritmaları bilgisayarlı görüş tabanlı çalışmaların önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Bu algoritmalar, insansız araçlardan toplanan verilerin etkili bir şekilde işlenmesi ve analiz edilmesi, daha önce emek yoğun ve zaman alıcı olan görevlerin otomatikleştirilmesi için olmazsa olmazdır [8]. Özellikle, derin öğrenmeye dayalı yöntemler, nesne tespit görevlerinde yüksek doğruluk ve hız sunarak bu alanda devrim yaratmıştır [9]. Gelişmiş sinir ağlarının kullanımıyla, bu yöntemler yolcu güvenliği için trafik izleme sistemleri, şehir planlamasında kentsel büyümenin analizi ve tarım alanlarındaki mahsul koşullarının izlenmesi gibi çeşitli uygulamalara uygulanmıştır.

Nesne tespit algoritmaları kullanılarak İHA tespiti, hem dost hem de düşman İHA'ların izlenmesi ve çoklu İHA operasyonlarının koordinasyonu gibi çeşitli uygulamalarda kritik bir rol oynar. Bu tespit yöntemleri, belirli bölgelerde İHA kullanımının izlenmesi, yetkisiz faaliyetlerin önlenmesi ve hava sahasının verimli bir şekilde yönetilmesi için oldukça değerlidir. Örneğin, askeri ortamlarda düşman İHA'larının tespiti zamanında karşı önlemler

alınmasını sağlarken, ticari hava sahasında dost İHA'ların takibi operasyonel verimliliğin ve güvenliğin korunmasına yardımcı olur. Derin öğrenme tabanlı nesne tespit algoritmaları, özellikle YOLO, hız ve doğruluk açısından üstün performansları nedeniyle bu uygulamalarda yaygın olarak kabul görmüştür [10]. YOLO algoritma ailesi, gerçek zamanlı tespit yetenekleriyle öne çıkar ve hızlı kararların kritik öneme sahip olduğu dinamik ortamlar için idealdir. Bu özellikler, İHA'ların hızlı ve öngörülemeyen hareketlerini olağanüstü bir hassasiyetle ele alabildikleri için YOLO tabanlı yöntemleri İHA tespit görevleri için özellikle etkili kılar.

Bu çalışmada, İHA'ları tespit etmek için YOLOv11 algoritması kullanılmış ve hava gözetimiyle ilgili zorlukların üstesinden gelme yeteneği gösterilmiştir. Tespit için gereken görüntüler, hedef İHA'ların ayrıntılı analizini ve doğru bir şekilde tanımlanmasını sağlayan yüksek çözünürlüklü bir kamerayla donatılmış bir İHA'dan elde edilmiştir. YOLOv11 algoritmasının İHA tespitindeki performansı çeşitli senaryolar ve çevre koşullarında incelenmiştir. Bu çalışma, algoritmanın zorlu koşullar altındaki tespit doğruluğunu, çıkarım hızını ve sağlamlığını değerlendirerek, algoritmanın hava sahası güvenliğini ve operasyonel verimliliği artırma potansiyelini vurgulamaktadır. Bulgular, YOLOv11'in İHA tespitindeki etkinliği ve gerçek dünya senaryolarındaki uygulanabilirliği hakkında değerli bilgiler sunarak, İHA tespit teknolojilerinde gelecekteki gelişmelerin önünü açmaktadır.

İHA Tabanlı Nesne Algılamanın Gelişimi ve Zorlukları

İHA'ların ortaya çıkışı ve hızla ilerlemesiyle birlikte, nesne tespiti uygulaması önemli ölçüde genişlemiş ve tamamen yeni boyutlar kazanmıştır. İHA'lar, yük kapasitesi, operasyonel irtifa, dayanıklılık ve uçuş menzili gibi kriterlere göre sabit kanatlı, döner kanatlı ve çırpınan kanatlı gibi çeşitli tiplere ayrılabilir. Bunlar arasında, günümüzde en yaygın kullanılanlar sabit kanatlı ve döner kanatlı İHA'lardır. Sabit kanatlı İHA'lar, yüksek hızlı uçuş kabiliyetleri, geniş menzilleri, yüksek irtifalara ulaşma kabiliyetleri ve daha büyük, daha ağır yükleri taşıma kapasiteleriyle dikkat çekmektedir. Öte yandan, nesne tespiti çalışmalarında yaygın olarak kullanılan döner kanatlı İHA'lar, özellikle zorlu arazilerde dikey kalkış ve iniş, alçak irtifa uçuşu ve çevik manevra kabiliyetinde mükemmeldir. Alçak irtifa ve sabit uçuş görevlerinde havada asılı kalma ve yüksek dayanıklılığı koruma kabiliyetleri, onları akıllı şehirler, akıllı ulaşım sistemleri, tarım, afet kurtarma ve endüstriyel operasyonlar gibi uygulamalarda paha biçilmez kılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü kameralar ve gelişmiş sensörlerle donatılmış döner kanatlı İHA'lar, tehlikeli veya ulaşılması zor yerlerde bile net ve anlamlı nesne verileri yakalar. Bu İHA'lar, çalışmanın özel hedeflerine bağlı olarak 0-5 m (göz hizasında görüş), 5-120 m (alçak-orta irtifa) ve 120 m ve üzeri (yüksek irtifa) dahil olmak üzere çeşitli irtifa seviyelerinde etkili bir şekilde çalışır. Özel sensörlerin entegrasyonu, İHA'ların karmaşık görevleri yüksek hassasiyet ve verimlilikle gerçekleştirmesini sağlar.

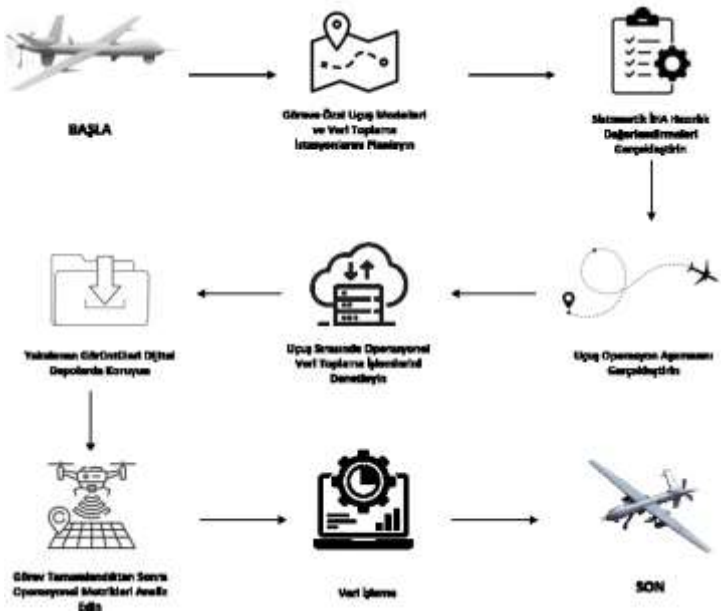
İHA sistemlerine entegre görsel sensörler, fotoelektrik teknolojisinden yararlanarak ayrıntılı nesne görüntüleri ve kinematik veriler sağlar. Bu sensörlerin işlevselliği ve performansı, daha doğru nesne tespiti ve analizi sağlayan derin öğrenme algoritmalarındaki gelişmelerle önemli ölçüde geliştirilmiştir. Ayrıca, nesnelerin mesafesini ve hızını ölçmek için İHA sistemlerine ultrasonik sensörler entegre edilmiştir. Bu sensörler, yüksek frekanslı ses dalgaları (insan

işitme aralığının ötesinde 20 kHz-40 kHz) yayar ve yansıyan dalgalar nesnelerden sektikten sonra yakalanır. Ses dalgalarının geri dönüş süresi hesaplanarak, nesneye olan mesafe yüksek doğrulukla belirlenebilir. İHA sistemlerine görsel ve ultrasonik sensörlerin entegrasyonu, tanımlanamayan İHA'lar gibi uçan nesnelerin kinematik özelliklerinin, hızları ve uçuş mesafeleri de dahil olmak üzere hassas bir şekilde belirlenmesini sağlar. Bu yetenekler, İHA'ların çeşitli alanlarda çok çeşitli görevleri yerine getirmedeki çok yönlülüğünü ve etkinliğini vurgular.

Sabit veya sabit kamera sistemleriyle nesne tespitinde en kritik faktörlerden biri, çekilen görüntülerde nesnenin tutarlı yan profilidir. Önceden tanımlanmış bir alanı gözlemlemek için sabit kameralar kullanıldığında, nesneler sürekli olarak aynı açıdan görünür ve arka plan sabit kalır. Hareketli nesneler daha sonra bu sabit sahne içinde tanımlanır. Genel olarak, sabit bir kamerayla nesne tespitinde, ışık değişiklikleri ve görüntü gürültüsü genellikle minimum düzeydedir. Ancak İHA sistemlerinde durum oldukça farklıdır. İHA tabanlı nesne tespitinde, hava koşullarından etkilenen İHA'nın hızlı ve çevik hareketleri, görüntü titremesi, gürültü, ani ışık değişiklikleri ve bulanıklık gibi zorluklara yol açabilir. Ek olarak, İHA'lar genellikle yüksek irtifalardan görüntü aldığından, nesneler daha küçük görünür ve nesnelerin yoğunluğu eşit olarak dağılmaz. Yüksek irtifalardan çekilen görüntülerde nesnelerin kapladığı alanın, maksimum 5 m yükseklikte sabitlenmiş kameralarla çekilen görüntülere oranı önemli ölçüde daha düşüktür. Bu düşük nesne-arka plan oranı, nesne bozulmasına neden olur ve birden fazla nesnenin tespitini zorlaştırır. Dahası, genel nesne tespit sistemlerinde kullanılan maskeleme teknikleri, İHA sistemlerine kıyasla daha az etkilidir. Sonuç olarak, İHA görüntülerinde genellikle maskelenen nesne oranı düşüktür ve bu da tespiti daha da zorlaştırır. İHA görüntüleri, ağaçlar veya binalar gibi daha büyük nesnelerin hedef nesneyi gizleyebileceği maskeleme sorunlarına özellikle açıktır. Farklı senaryolarda karşılaşılan farklı maskeleme türleri, İHA sistemleriyle nesne tespitini önemli ölçüde zorlaştırır.

Veri Seti Oluşturma

Bu çalışmada, veri setindeki tanımlanamayan İHA tespiti için görüntü çeşitliliğinin sağlanması, algoritmanın gerçek dünya senaryolarındaki sağlamlığını ve performansını artırmak için kritik öneme sahiptir. Çalışma özellikle döner kanatlı İHA modellerinin tespiti üzerine odaklanmaktadır. Bu görev için, yüksek performanslı SJRC F11 Pro drone, istikrarlı ve yüksek performanslı uçuş kabiliyetleri sağlamak amacıyla daha gelişmiş bir pervane ile yükseltilmiştir. Yüksek kaliteli ve kapsamlı görüntü setleri elde etmek için, ticari drone'a 4056x3040 piksel sensör çözünürlüğü, 6,287 mm x 4,712 mm görüntü alanı ve 1/2,3 inç optik boyuta sahip bir Raspberry Pi HQ Kamera sistemi entegre edilmiştir. Ayrıca, kimliği belirsiz İHA ile tespit sistemi arasındaki mesafeyi ölçmek için ultrasonik sensörler yerleştirilmiştir. Özelleştirilmiş İHA uçuş görevleri sırasında çekilen detaylı ve doğru İHA görüntü videolarından ayrı ayrı kareler çıkarılarak güvenilir bir veri seti oluşturulmuştur. Tek bir pil şarjıyla yaklaşık 29 dakikalık uçuş süresiyle, İHA bir dizi görevi gerçekleştirmek için yeterli zaman sağlamıştır. Veri toplama sürecini özetleyen bir görev akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kimliği belirsiz İHA tespiti için veri toplama sürecini gösteren görev akış şeması. Bu süreç, döner kanatlı İHA tespiti yoluyla görüntü çeşitliliğinin artırılması, yüksek çözünürlüklü görüntü yakalama için gelişmiş Raspberry Pi HQ Kamera entegrasyonu ve hassas mesafe ölçümleri için ultrasonik sensörlerin kullanımını içermektedir.

İHA sistemleri, hava görüntüleme yoluyla kimliği belirsiz İHA tespiti sırasında karşılaşılan zorluklar için çeşitli çözümler sunar. Manuel uçuş modunda, insan faktörlerinden kaynaklanan ek hata payı süreci zorlaştırır. İnsan hatalarını en aza indirmek ve karışıklığı önlemek için çeşitli uçuş modları kullanılmıştır. Otonom sürüş modu, daha kapsamlı bir uçuş olanağı sağlamıştır. Bu yetenekler, İHA'nın çevik ve sistematik manevralarla birden fazla açıdan görüntü yakalamasını sağlar. Algoritmanın eğitimi ve testleri, gerçek dünya durumlarını yakından yansıtan senaryolar kullanılarak gerçekleştirildi ve görüntüler farklı kamera yönleri ve irtifalarda çekildi. İHA uçuş parametrelerinin çeşitlendirilmesiyle, insan hatası olasılığı en aza indirildi ve bu da kapsamlı ve çeşitli bir veri kümesinin elde edilmesiyle sonuçlandı. İHA'nın otonom çalışması, değişen hava koşullarında doğru veri toplanmasını sağlayarak, kimliği belirsiz İHA görüntülerinin hassas bir şekilde yakalanmasını sağladı.

Veri seti, farklı irtifalarda, kamera açılarında ve günün farklı saatlerinde çekilen görüntülere parlaklık, kontrast ve renk ayarlarıyla birlikte çeşitli filtreleme teknikleri uygulanarak iyileştirildi. Bu iyileştirme ve eğitim veri setinin çeşitli görüntülerle zenginleştirilmesi, algoritmanın zorlu koşullara karşı dayanıklılığını önemli ölçüde artırdı. Sonuç olarak, nihai veri setindeki 5.875 görüntünün %70'i eğitim amaçlı olarak belirlendi. Eğitim veri seti özellikle uzun mesafelerden çekilen İHA görüntüleri, karmaşık arka planlara sahip zorlu görüntüler ve kapalı bulutlu koşullarda çekilen ayırt edilmesi zor İHA görüntülerini içeriyordu. Zorlu koşullar içeren bu veri seti üzerinde eğitilen YOLOv11 modeli, toplam veri setinin %10'unu oluşturan bir doğrulama veri seti kullanılarak doğrulandı. Modelin zorlu ortamlardaki performansını ve İHA'ları tespit etme yeteneğini değerlendirmek için çeşitli koşulları temsil eden bir test veri seti hazırlandı. Bu test veri seti, tüm veri setinin %20'sini oluşturdu ve insansız hava aracı tespit testleri yapmak için kullanıldı.

YOLOv11 ile İHA Tabanlı Nesne Algılama

YOLO ailesinin oldukça gelişmiş bir üyesi olan YOLOv11 modeli, selefi modellerin güçlü yönlerini temel alarak gerçek zamanlı nesne tespitinde en popüler ve yüksek performanslı seçeneklerden biri olarak konumlanıyor. Olağanüstü doğruluğu ve verimliliği, onu hava gözetim uygulamaları için özellikle umut verici kılıyor. YOLOv11, çıkarım maliyeti ve çıkarım süresi arasında bir denge kurarak tespit performansını optimize ediyor ve bu da karmaşık senaryolarda iyi performans gösterme yeteneğini artırıyor. Omurga ağ mimarisindeki yenilikler sayesinde algoritma, nesne yönelimi, ölçek ve boyutla ilgili sınırlamaların üstesinden gelebiliyor, bu da onu çeşitli uygulamalar için çok yönlü hale getiriyor ve kısıtlamaları azaltıyor. Hava gözetimindeki temel kriter, bir algoritmanın yüksek hızda çalışırken tespit doğruluğunu koruyabilme yeteneğidir. Örneğin orta büyüklükteki YOLOv11m modeli, daha az sayıda parametresi sayesinde yüksek tespit hassasiyetini korurken, selefi YOLOv8m'ye kıyasla eğitim süresini %22 oranında azaltıyor. Ayrıca, YOLOv11, selefi YOLOv10'a kıyasla %2 daha hızlı ortalama çıkarım süresi sunar. Bu performans iyileştirmeleri, daha küçük model boyutuyla bir araya gelerek YOLOv11'i gerçek dünya hava görüntüsü analizi için kritik hale getirir.

YOLOv11, ağ mimarisinde hem hızı hem de doğruluğu optimize eden önemli geliştirmeler sunar. YOLO ailesinin önemli bir işlem birimi olan omurga ağı, EfficientNet veya CSPNet sinir ağlarına dayalı gelişmiş bir özellik çıkarma yöntemi kullanır. Mimari, önceki sürümlere kıyasla nesne algılama yeteneklerini önemli ölçüde artıran C3K2 ve C2PSA adlı iki yeni modül içerir. YOLOv8'deki C2f modülünden türetilen C3K2 modülü, c3k parametresi aracılığıyla değişken yapılandırılabilirlik sunar. Etkinleştirildiğinde, c3k modülü, YOLOv8'deki önceki modülle paralel çalışarak orijinal darboğaz yapısını korurken, C3 yapısının gelişmiş özellik çıkarma yeteneklerinden yararlanır. Bir diğer önemli yenilik olan C2PSA modülü, C2f modülüne Konum Farkında Dikkat (PSA) mekanizmasını getirerek modelin giriş özelliklerindeki anlamsal bilgileri ölçekleme ve uzamsal ilişkileri ayırt etme yeteneğini geliştirir. PSA mekanizması, YOLOv11'in karmaşık arka planlara sahip görüntülerdeki sağlamlığını artırır ve çok başlı dikkat ve ileri beslemeli ağ yapısı aracılığıyla algılama performansını artırır. YOLOv11'in omurgasından çıkarılan özellikler daha sonra boyuna iletilir ve burada görüntüdeki hem yakın hem de uzak çeşitli boyutlardaki nesnelere odaklanmak için birleştirilir. YOLOv11 kafası bu özelliklerden anlamsal bilgi üretir ve yalnızca nesnelerin varlığını değil, aynı zamanda kesin konumlarını da belirler. YOLOv11'in optimize edilmiş mimarisi, karmaşık görüntülerde bile küçük nesnelerin bile gözden kaçırılmamasını sağlar. Ayrıca, azaltılmış hesaplama maliyetleri onu daha karmaşık görevler ve daha büyük projeler için uygun hale getirir. Farklı model boyutlarına ihtiyaç duyan kullanıcılar için YOLOv11, hız ve performans için optimize edilmiş beş alt model sunar: YOLOv11n, YOLOv11s, YOLOv11m, YOLOv11l ve YOLOv11x. Bu modellerin her biri, gerçek zamanlı uygulamalar için özel olarak tasarlanmış küçük modellerden büyük modellere kadar hız ve performans açısından optimize edilmiştir.

Bulgular

YOLOv11 algoritması kullanılarak elde edilen tespit sonuçları, algoritmanın hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı İHA'ları tespit etmedeki sağlamlığını ve güvenilirliğini göstermektedir. İHA tespitine ilişkin karşılaştırmalı performans metrikleri Tablo 1'de derlenmiştir. Sabit kanatlı İHA tespiti için YOLOv11, 0,854 hassasiyet, 0,861 geri çağırma, 0,926 mAP ve 0,857 F1 puanı elde etmiştir. Bu metrikler, yüksek doğruluk ve hassasiyet ile geri çağırma arasında dengeli bir performansa işaret etmekte olup, algoritmanın sabit kanatlı İHA'ları etkili bir şekilde tespit ederken hatalı pozitif ve hatalı negatifleri en aza indirme becerisini yansıtmaktadır. Döner kanatlı İHA tespiti için ise YOLOv11, 0,925 hassasiyet, 0,901 geri çağırma, 0,904 mAP ve 0,913 F1 puanı ile daha da iyi bir performans sergilemiştir. Daha yüksek hassasiyet değeri, YOLOv11'in döner kanatlı İHA'ları minimum yanlış alarmla tespit etme kabiliyetini göstermektedir; bu da İHA türleri arasında doğru ayrımın kritik öneme sahip olduğu uygulamalarda kritik öneme sahiptir.

YOLOv11'in performansı hakkında daha net sonuçlar çıkarmak için, önceki iki sürüm olan YOLOv10 ve YOLOv9 ile de testler gerçekleştirilmiştir. YOLOv10 ile karşılaştırıldığında, YOLOv11, özellikle sabit kanatlı İHA tespiti için tespit performansında önemli gelişmeler göstermiştir. YOLOv10 için hassasiyet 0,808, geri çağırma 0,793, mAP 0,798 ve F1 puanı 0,800 olmuştur. Bu değerler, YOLOv11 ile elde edilenlerden sürekli olarak daha düşük olmuştur ve bu da YOLOv11'in bu İHA türü için geliştirilmiş doğruluk ve sağlamlığını vurgulamaktadır. En dikkat çekici gelişme, YOLO11'in üstün nesne tespit kabiliyetlerini yansıtan, YOLOv10'u %12,8 oranında geride bıraktığı mAP'de gözlemlenmiştir. Döner kanatlı İHA tespiti için YOLOv10, 0,919 hassasiyet, 0,892 geri çağırma, 0,906 mAP ve 0,905 F1 puanı elde etti. Bu sonuçlar rekabetçi olsa ve YOLOv10'un etkinliğini vurgulasa da, YOLOv11, özellikle F1 puanında (0,905'e kıyasla 0,913) hafif bir avantaj gösterdi ve tüm değerlendirme ölçütlerinde daha dengeli bir performans sergiledi.

YOLOv9 ile elde edilen tespit sonuçları, YOLOv11 ile karşılaştırıldığında karışık bir performans gösterdi. Sabit kanatlı İHA tespiti için YOLOv9, 0,837 hassasiyet, 0,855 geri çağırma, 0,847 mAP ve 0,856 F1 puanı elde etti. Bu değerler nispeten yüksek ve rekabetçi olsa da, YOLOv11'in daha yüksek mAP'si (0,926) ve hassasiyeti (0,854), sabit kanatlı İHA'ları tespit etmedeki üstünlüğünü daha da doğrulamaktadır. Hassasiyet ve mAP'deki iyileştirmeler, özellikle yanlış pozitifleri azaltmak ve karmaşık ortamlarda genel tespit doğruluğunu artırmak için kritik öneme sahiptir. Döner kanatlı İHA tespiti için YOLOv9, 0,929 hassasiyet, 0,903 geri çağırma, 0,918 mAP ve 0,916 F1 puanı elde etmiştir. Bu sonuçlar, YOLOv9'un hassasiyet (0,929'a karşı 0,925) ve mAP (0,918'e karşı 0,904) açısından YOLOv11'i biraz geride bırakmasıyla YOLOv11'in sonuçlarıyla karşılaştırılabilir. Ancak YOLOv11 daha yüksek bir F1 puanı (0,913'e karşı 0,916) sergileyerek daha dengeli bir performans gösterdi ve bu da onu birden fazla metrikte tutarlı sonuçlar gerektiren gerçek dünya uygulamaları için daha çok yönlü bir seçenek haline getirdi. Sonuçlar, özellikle sabit kanatlı İHA'ların tespitinde YOLOv11'de tanıtılan gelişmeleri açıkça vurgulamaktadır; bu alanda YOLOv10 ve YOLOv9'dan önemli ölçüde daha iyi performans göstermektedir. mAP ve F1 puanlarındaki iyileştirmeler muhtemelen güncellenmiş ağ mimarisini ve optimize edilmiş eğitim prosedürlerini yansıtmakta ve YOLOv11'in gelişmiş özellik çıkarma ve sınıflandırma

yeteneklerini vurgulamaktadır. Bu nitelikler, YOLOv11'i yüksek doğruluk ve minimum hata gerektiren uygulamalar için güvenilir bir algoritma haline getirmektedir. Döner kanatlı İHA tespiti durumunda, YOLOv11'in performansı, hassasiyet ve F1 puanında küçük farklılıklarla YOLOv9 ile oldukça benzerdir. Bu, YOLOv11 genel iyileştirmeler sunarken, döner kanatlı İHA tespitinin belirli yönlerinin YOLOv9'da zaten neredeyse optimum düzeyde olabileceğini göstermektedir. Sonuçlar ayrıca, hem YOLOv11 hem de YOLOv9'un döner kanatlı İHA'ları ayırt etmede oldukça yetenekli olduğunu ve YOLOv11'in biraz daha dengeli bir çıktı sağladığını göstermektedir.

YOLOv10 diğer iki versiyonla karşılaştırıldığında, özellikle sabit kanatlı İHA tespiti için performansı daha az güçlü görünmektedir. Daha düşük hassasiyet ve mAP değerleri, İHA'ları doğru bir şekilde tespit etmedeki sınırlamalarını vurgulamaktadır; bu sınırlamalar, daha az gelişmiş özellik çıkarma mekanizmalarına ve eğitim metodolojilerine bağlanabilir. Sonuç olarak, YOLOv11, İHA tespiti için en güvenilir ve çok yönlü algoritma olarak ortaya çıkmakta ve YOLOv10'a göre önemli iyileştirmeler sunmakta ve YOLOv9 ile rekabet gücünü korumaktadır. Yüksek hassasiyet ve dengeli sonuçlar sağlama yeteneği, onu çeşitli hava gözetleme uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Gelecekteki araştırmalar, döner kanatlı İHA tespit performansını artırmak ve diğer nesne tespit görevlerine uygulanabilirliğini genişletmek için YOLOv11'in mimarisinde daha fazla optimizasyon araştırabilir.

Tablo 1. YOLOv11 algoritması kullanılarak İHA tespiti için performans ölçütleri. Tablo, hem sabit kanatlı hem de döner kanatlı İHA tespiti için hassasiyet, geri çağırma, mAP ve F1 puanlarını sunarak, YOLOv11'in sabit kanatlı İHA'ları tespit etmedeki dengeli performansını ve döner kanatlı İHA tespiti için yanlış alarmları en aza indirmedeki sağlamlığını vurgulamaktadır. Bu ölçütler, algoritmanın farklı İHA türleri arasında doğru bir şekilde ayrım yapma konusundaki güvenilirliğini ve etkinliğini vurgulamaktadır.

Model	**İHA Modelleri**	**Performans Metrikleri**			
		Precision	**Recall**	**mAP**	**F1-Score**
YOLOv11	Sabit-K.	0.854	0.861	0.926	0.857
	Döner-K.	0.925	0.901	0.904	0.913
	Genel	0.889	0.881	0.915	0.885
YOLOv10	Sabit-K.	0.808	0.793	0.798	0.800
	Döner-K.	0.919	0.892	0.906	0.905
	Genel	0.863	0.842	0.852	0.852
YOLOv9	Sabit-K.	0.837	0.855	0.847	0.846
	Döner-K.	0.929	0.903	0.918	0.916
	Genel	0.883	0.879	0.882	0.881

Sonuç

Bu çalışmanın sonuçları, YOLOv11 algoritmasının İHA tespit görevlerinde etkinliğini, sabit kanatlı ve döner kanatlı İHA'lar için hassasiyet, geri çağırma, mAP ve F1 puanları açısından öncülleri YOLOv10 ve YOLOv9'u geride bırakarak göstermektedir. YOLOv11, özellikle yüksek hassasiyet ve değişen İHA konfigürasyonlarına uyum gerektiren durumlarda üstün tespit yetenekleri sergilemiştir. Bulgular, hava gözetimi, hava sahası yönetimi ve İHA faaliyet izleme alanlarında gerçek dünya uygulamaları için potansiyelini vurgulamaktadır. Kapsamlı bir analiz, YOLOv11'in tespit doğruluğu ve güvenilirlik arasında sağlam bir denge sağladığını ve YOLOv10'a göre önemli iyileştirmeler sağladığını ortaya koymuştur. YOLOv10 uygulanabilirliğini korurken, sabit kanatlı İHA'ları tespit etmede sınırlamalar göstermektedir. YOLOv9, döner kanatlı İHA'ları tespit etmede iyi bir performans göstermiş, ancak YOLOv11'in tutarlı performansına ulaşamamıştır. Bu sonuçlar, derin öğrenmeye dayalı nesne tespit algoritmalarındaki ilerlemeyi ve İHA tespit sistemlerini geliştirmedeki temel rollerini vurgulamaktadır. Çalışma, YOLOv11'in gerçek dünya bağlamlarında uygulanabilirliğini doğrularken, önceki sürümlerin güçlü ve zayıf yönlerine dair değerli bilgiler sunuyor.

References

1. A. Ryan, M. Zennaro, A. Howell, R. Sengupta and J. K. Hedrick, "An overview of emerging results in cooperative UAV control," 2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601), Nassau, Bahamas, 2004, pp. 602-607.

2. Shakeri, R. et al.: Design Challenges of Multi-UAV Systems in Cyber-Physical Applications: A Comprehensive Survey and Future Directions. IEEE Communications Surveys & Tutorials 21(4), 3340-3385 (2019).

3. A. M. Samad, N. Kamarulzaman, M. A. Hamdani, T. A. Mastor and K. A. Hashim, "The potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for civilian and mapping application," 2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology, Shah Alam, Malaysia, 2013, pp. 313-318.

4. Motlagh, N.H., Bagaa, M., Taleb, T.: UAV-Based IoT Platform: A Crowd Surveillance Use Case. IEEE Communications Magazine 55(2), 128-134 (2017).

5. Fotouhi, A. et al.: Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials 21(4), 3417-3442 (2019).

6. Thammawichai, M., Baliyarasimhuni, S.P., Kerrigan, E.C., Sousa, J.B.: Optimizing Communication and Computation for Multi-UAV Information Gathering Applications. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 54(2), 601-615 (2018).

7. Adil, M., Jan, M.A., Liu, Y., Abulkasim, H., Farouk, A., Song, H.: A Systematic Survey: Security Threats to UAV-Aided IoT Applications, Taxonomy, Current Challenges and Requirements With Future Research Directions. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 24(2), 1437-1455 (2023).

8. S. Montambault, J. Beaudry, K. Toussaint and N. Pouliot, "On the application of VTOL UAVs to the inspection of power utility assets," 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, QC, Canada, 2010, pp. 1-7.

9. Gupta, L., Jain, R., Vaszkun, G.: Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials 18(2), 1123-1152 (2016).

10. Y. Naidoo, R. Stopforth and G. Bright, "Development of an UAV for search & rescue applications," IEEE Africon '11, Victoria Falls, Zambia, 2011, pp. 1-6.

MODERN TANK SİSTEMLERİNDE ANTİ-TANK TEHDİTLERİNE KARŞI AKTİF KORUMA YAKLAŞIMI BENZETİMİ

Halil İbrahim Dinçel[1] Toygun Kip[2] Işıl Yazar[3]

[1]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü Büyükdere Mah. Prof. Dr. Nabi AVCI Bulvarı No:4 Eskişehir TÜRKİYE

Tel: 0505 024 4353 E-Posta: halil.dincil91@gmail.com

[2]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü Büyükdere Mah. Prof. Dr. Nabi AVCI Bulvarı No:4 Eskişehir TÜRKİYE

Tel: 0505 063 2918 E-Posta: toygunkip@yandex.com

[3]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Meşelik Kampüsü Büyükdere Mah. Prof. Dr. Nabi AVCI Bulvarı No:4 Eskişehir TÜRKİYE

Tel: 0222 239 3750 E-Posta: iyazar@ogu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Anti tank, Roket karşı savunma, Tehdit algılama, Sensör Teknolojileri

ÖZET

Günümüz nizami ve gayri nizami savaşlarında uzun ve kısa menzilli füzeler savaşın seyrini değiştirmektedir. Füzelerin menzilinin artması zırhlı araç ve binaları zorunlu hale getirmiştir. Bu zırhlı araçlardan biri olan tanklar, zırhlı muharebe ve personel taşıma alanında savaşın seyrini değiştiren kritik araçlardır. Ancak, büyük boyutları ve sınırlı hareket kabiliyetleri nedeniyle gizlenmeleri ve roketlerden kaçmaları oldukça zordur. Zırhları, geleneksel tehditlere karşı dirençli olsa da, modern güdümlü anti-tank füzeleri ve Rocket Propelled Grenade (RPG) silahları, tankları etkisiz hale getirebilmektedir. Bu durum hem tank mürettebatının hem de operasyonun güvenliğini riske atmaktadır. Bu tehditlere karşı geliştirilen aktif koruma sistemleri, mesafe dedektörlü tapa sistemlerini kullanarak tankların savunmasını güçlendirmektedir. Sistem, gelen tehditin doğrultusunu yapay zekâ ile algılayarak, karşı tapa fırlatır. Tehdit, roketi etkileyecek bir mesafeye geldiğinde tapa patlar ve tehditi yok ederek tankın zarar görmesini engeller. Türkiye'deki savunma sanayi firmalarının geliştirdiği sistemler, bu teknolojiye önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bu çalışma kapsamında, mesafe dedektörlü tapa sisteminin devre kartı kullanılarak benzetimi yapılmış ve performansı gözlemlenmiştir. Devre kartı tabanlı bir sistem kullanılarak mesafe sensörleri ve renkli LED'ler yardımıyla belirli mesafe aralıkları tanımlanmıştır. Çevredeki nesnelerin uzaklıkları ölçülerek, tapa sisteminin tehditlere karşı verdiği tepkiler görselleştirilmiştir. Bu benzetim, lisansseviyesinde sistemin güvenilirliği ve çalışma prensibini gözlemleme amacıyla yapılmıştır. Sonuç olarak, çalışmanın bulguları, tapa sistemlerinin etkinliğini ve aktif koruma sistemlerinin önemini vurgularken, bu tür teknolojilerin modern savaş alanlarında tankların güvenliğini artırmada oynadığı kritik rolü gözler önüne sermektedir.

1. GİRİŞ

Teknoloji her geçen gün daha hızlı gelişmektedir. Gelişen teknolojiyle beraber savaşların şekli ve tarzı değişmektedir.

Tüfek ve tabancalarla beraber meydan muharebelerinin yerini siper savaşları almıştır. Siper savaşları uzun menzilden karşılıklı atış getirdiği için piyade personeli korumak zorunlu hale gelmiştir.

Bunu engellemek için zırhlı binalar ve araçlar geliştirilmiş ve siper savaşına karşı etkili olmuştur. Askeri araçlar genellikle şarapnel, mermi, top mermisi, roket ve füzelerin etkisine dayanacak şekilde zırhlıdır ve içerideki personeli düşman ateşinden korur. Bu tür araçlar arasında tanklar, uçaklar ve gemiler gibi zırhlı savaş araçları bulunur. Zırhlı sistemler piyade için dokunulmazdır piyade tüfekleri günümüz zırh sistemlerine zarar verememektedir. Zırhlı araçların en bilindik olanları tanklardır.

Tank; savaş alanlarında yüksek manevra kabiliyetine sahip personele ekstra hız ve güç sağlayan, yüksek ateş gücü sayesinde kara birliklerine karşı üstünlük sağlayan, komutanın vurucu gücü ve vazgeçilmez bir
karar silahıdır.

Tank birlikleri; uzun menzilli olduğu ve yakın çatışma için verimli olmadığı için diğer sınıf ve silahlarla koordineli olarak ateş, manevra ve darbe etkisinden faydalanmak suretiyle düşmana yaklaşır ve onu yok eder.

Tank birlikleri aynı zamanda; sahip olduğu yüksek ateş gücü, şekil 1'de görüldüğü gibi her türlü zorlu arazi
koşul ve şartlarında hareket yeteneği sağlayan paletleri, piyade tipi silahlara karşı aşılamaz zırh koruması ve yıkıcı darbe etkisi özelliği ile her çeşit muharebede sürekli harekât olanak ve yeteneği sağlar. [1]

Bu özelliklerine rağmen tanklar; anti tank füzelerine, mayınlara, topçu a t e ş i n e ve hava saldırısına karşı zayıftırlar.

Bu çalışmada ilk olarak genel özet bölümüne 1.bölümde sistemlerin ön tanıtımına 2.bölümde anti tank, aktif koruma ve elektronik koruma sistemlerinin incelenmesine, 3.bölümde benzetim modelimin tanıtımına 4.bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir.



Şekil 1: Altay tankı [2]

2. METODOLOJİ

2.1 Anti Tank Güdümlü Füzeler

Anti-Tank Güdümlü Füzeler; ana muharebe tankı (AMT), zırhlı muharebe aracı (ZMA) ve zırhlı personel taşıyıcı (ZPT) gibi yüksek zırh korumasına sahip kara platformlarını imha etmek üzere geliştirilmiş silah sistemleridir.

Kullanılan ilk anti tank füzeler tel güdümlü füzelerdi. Çeşitli savaşlarda kullanılan tel güdümlü füzeler %10 oranında başarılı vuruş yapmıştır. Yıllar geçtikçe daha kullanışlı hale gelen anti-tank güdümlü füzeler, çok daha etkili olan hem zırhı delmek hem de deliş sonrası tankın içinde taşıdığı patlayıcının infilakı ile zarar verebilmek için üretilmiş mühimmat olan

[3] yüksek patlayıcılı anti-tank (HEAT) harp başlıkları ile donatılmışlardır. Bu güçlü savaş başlıkları sayesinde günümüz modern ana muharebe tanklarını tek bir atışla saf dışı edilebilmektedir.

[4] Hızlarının yüksek olmasının yanında bazı anti tank sistemleri vurulmasının ekstra zorlaşması için zikzaklar çizerek gitmekte ya da tankın zırh bakımından daha zayıf kısmı olan tepe noktasını vurabilmek için yükselip dalış yapmaktadır.

Fırlatıldıkları yerler bakımından sabit ve mobil kara platformları, savaş gemileri, helikopter ile İHA gibi hava platformları ve Şekil 2'deki gibi Tek-Er tarafından ateşlenme şeklinde ayrılan anti tank sistemleri teknoloji seviyeleri bakımından da üç nesle ayrılmaktadır. [5]

2.1.1 Birinci Nesil ATGM (MCLOS)

Birinci nesil güdüm teknolojileri görüş hattı boyunca elle kumanda edilen sistemlerden oluşmaktadır. Bu füzeyi hedefe yönlendirmek için bir operatör tarafından sürekli joystick kontrolü gerekmektedir. Bu sistemde operatörün iyi eğitimli olması ve sürekli olarak füzenin hedefe yönelmesini sağlayabilecek kadar simülatör deneyimi olması gerekmektedir. Sistemin en büyük dezavantajı kontrol için operatörün sürekli sabit kalması ve füze ve hedefi sürekli görmesi gerekmektedir. Bu da operatörü açık hedef haline getirmektedir.

Birinci nesil sistemler düşük isabet olasılığı, modern zırhları delme yeteneğinin sınırlı olması ve diğer sorunlar nedeniyle modası geçmiş olarak tanımlandı. [6]

1.1.1 İkinci Nesil ATGM (SACLOS)

Birinci nesil sistemi olan MCLOS'a benzer bir mimari olan SACLOS'da (Semi Authomatic Command Line of Sight) güdüm yine operatör tarafından yapılır fakat füzenin kontrol yüzeylerinin kontrolü, yani ikinci faz füzenin kontrolündedir. Operatör sadece kontrol yüzeylerinin ayarlanmasını sağlamaktadır, diğer hareketler füze tarafından otomatik yapılmaktadır. [7]

SACLOS kullanan füzeler; kablo, telsiz veya ışın güdümlü olarak üçe ayrılmaktadır.[8]

1.1.1.1 Kablo güdümlü SACLOS

Kablo Güdümlü SACLOS kullanan ATGM, fırlatılış anından itibaren operatör tarafından optik nişangah tarafından izlenmektedir.
Operatör, nişangah ile füze arasında bağlı bulunan iki tel aracılığı ile elektrik sinyali göndermek suretiyle füzenin yörüngesini düzeltir. İletişim yöntemi olarak kablo kullanıldğı için sistem elektronik karıştırma sistemleri (jamming) tarafından da engellenememektedir. Dezavantajı füzenin menzilinin kablo boyu ile sınırlı olmasıdır. [9]

1.1.1.2 Telsiz Güdümlü SACLOS

Telsiz Güdümlü anti-tank güdümlü füzeler de kablo güdümlü anti-tank güdümlü füzeler gibi fırlatılış anından itibaren operatör tarafından optik nişangah tarafından izlenmektedir. Ancak burada operatör yörünge düzeltmelerini, radyo sinyali aracılığı ile yapmaktadır. Telsiz güdümlü füzeler kablo güdümlülerin aksine karıştırmaya (jamming) maruz kalabilecekleri için daha kullanışsızdırlar. Kabloluya göre avantajı, menzilinin tel uzunluğuna bağlı olmamasıdır.

1.1.1.3 Işın Güdümlü

SACLOS

Işın güdümlü SACLOS sisteminde nişangah düzeneği hedef tarafından yayılan ışımayı takip etmektedir. Bu sistemde üç farklı yol izlemektedir. İlki füzenin içerisindeki algılayıcılar operatör tarafından gönderilen hedefleme ışını takip etmekte, ikincisi füzenin burun kısmında bulunan alıcılar hedeften dönen radar sinyallerini izlemekte, üçüncü olarak füze hedef tarafından yayılan ışınları izlemektedir. Füzenin içerisindeki elektronik devreler ışını merkez alarak ilerler. Işın güdümlü füzeler düz bir uçuş rotası ile ilerlediklerinden yüksek hızlı hedefler örneğin uçaklara karşı etkisiz kalıyordu. Bu sebepten ötürü, birçok uçaksavar füzesi düz bir ışın rotasını takip etmek yerine kendi hedef rotalarını izlemektedir. Günümüz sistemlerinde ışın hedefe kilitlenmekte ve füze kilitlenilen noktaya doğru ilerlemektedir. [10]

1.1.1 Üçüncü Nesil ATGM

Üçüncü nesil anti tank güdümlü füzeleri , At- Unut ve Gör-İzle (Line of Sight Guidance) olarak iki gruba ayrılmışlardır. [11]

1.1.1.1 At-Unut Tipi ATGM

At-unut sistemi kullanan füze bir kez hedefine güdümlendikten (kilitlendikten) sonra onu fırlatan operatörün hedefin görüş hattı içinde olma mecburiyeti yoktur. Sistemin en önemli avantajı füzeyi fırlatan operatörün veya aracın fırlatmanın ardından hemen bölgeden ayrılmasını mümkün kılmasıdır.

Genellikle hedef hakkındaki tüm bilgiler ateşlenmeden önce füzeye programlanmaktadır. Bu bilgiler hedefin koordinatları, radar ölçümleri ya da kızılötesi resimlerinden oluşmaktadır. Füze ateşlendikten sonra seyrüsefer sistemi olarak jiroskop, ivmeölçer, GPS, radar ve kızılötesi görüş aletlerinin bir nevi kombinasyonundan faydalanmaktadır. Bu nedenle füze yörünge hesaplarını otonom olarak yapabilmektedir.

Bunun yanında; gece/gündüz ve her türlü hava koşulunda görev yapabilme, sütre gerisinden atış ve yüksek isabet yeteneklerine sahiptir. [12

1.1.1.1 Gör İzle Sistemi (Semi Active Laser Hooming – SALH)

İnsan operatör ile yüksek hassasiyetli lazer işaretleyici/algılayıcıdan oluşur. SALH'de insan faktörü azdır. İnsan operatörün sorumluluğu hedefin tespit edilmesi ve lazer işaretleyicinin hedef üzerinde tutulmasıdır.
Füze ile operatörün kullandığı fırlatma terminali arasında iletişim yoktur, bu yüzden telsiz alıcı/verici, kablo gibi ekipman kullanılmamaktadır. Füzenin yönlendirilmesi füze güdüm bilgisayarı tarafından otomatik olarak yapılmaktadır. Bunun için operatör tarafından kullanılan terminalden hedef üzerine lazer ışığı tutulur.
Hedeften geri yansıyan lazer ışını, füzenin baş kısmında bulunan lazer algılayıcı sensör tarafından algılanarak, füzenin lazer tutulan noktaya gitmesi için gereken rota hesaplanmaktadır. [13]



Şekil 2: Omuzdan atılan anti tank füzesi [14]

Özellikle üçüncü nesil anti-tank güdümlü sistemleri sahip oldukları teknoloji ve hesaplama yetenekleri sayesinde elektronik harp sistemleriyle durdurulamamaktadır. Bu nedenle bu sistemleri durdurmak için özel olarak aktif koruma sistemleri gerekmektedir.

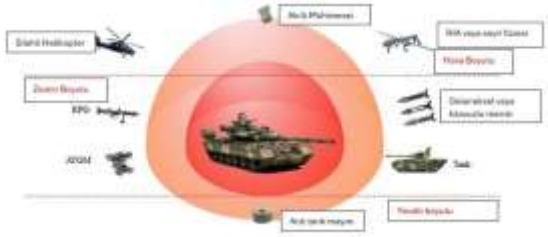
1.1 Aktif Koruma Sistemleri

Anti tank sistemlerinin hızlı olmasından,omuzdan fırlatılmasından ve hedefe giderken izlediği rotanın belirsiz olmasından dolayı tank personeli tarafından önlem alınmasının zor olduğu gibi genellikle saha personeli tarafından da engellenememektedir. Tankların hantal ve büyük olmasından dolayı anti tank sistemlerinden gizlenmesi de mümkün olmamaktadır. Bu nedenle ekstra güvenlik önlemi olarak anti tank sistemlerinin tanka ulaşmasının engellenmesi ya da daha önce patlaması sağlanarak zırhın hasar görmesi engellenmektedir.

Tehdidi algılamak ve engellemek için aktif koruma sistemi denilen tanka entegre birnsistem geliştirilmiştir.
Sistem dedektörü, araca saldıran bir mühimmat tespit ederse, gelen mühimmatı takip etmekte, saldırı yönünü, hızını ve diğer bilgileri belirlemekte ve bunları kontrol merkezine göndermektedir. Kontrol merkezi, mevcut bilgileri çözer ve vericiye hazır duruma getirmek için bir sinyal göndermektedir. Gelen hedef müdahale menzilindeyse, kontrol merkezi uygun fırlatma anını hesaplamakta ve bunu karşı mühimmatı fırlatacak olan fırlatma sistemine göndermektedir. Karşı mühimmat gelen hedefe çarparsa, karşı mühimmat patlar ve gelen hedefi yok etmek için yüksek hızlı parçalardan oluşan büyük bir duman bulutu oluşturmaktadır. Farklı müdahale mesafelerine göre, sert imha sistemi yakın menzilli, orta menzilli ve uzun menzilli alt sistemlere ayrılabilmektedir. Savaş alanında tankların ve zırhlı araçların karşılaştığı tehditler değişmiştir.

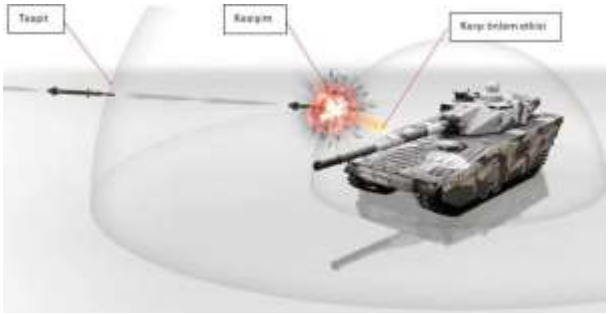
Genel olarak, modern savaş alanındaki tanklar ve zırhlı araçlar, Şekil 3'te gösterildiği gibi çok boyutlu tehditlerle karşı karşıyadır. Mekânsal boyutlar açısından hava, kara ve yeraltı boyutları vardır ve tankın tüm parçalarının saldırıya maruz kalması muhtemeldir. Tehdit türleri açısından ise tanksavar namlulu

silahlar, tank toplarından ateşlenen kinetik enerjili ve şekilli patlayıcılar, İHA veya silahlı helikopterlerden ateşlenen havadan yere ve seyir füzeleri, hassas mühimmatlar gibi çeviklik mühimmatları, mayın ve el yapımı patlayıcılar gibi yüksek güçlü bombalar ve diğer büyük kalibreli güdümlü veya güdümsüz toplar bulunmaktadır.



Şekil 3: Tankların karşı karşıya kaldığı tehditler [15]

Mevcut sert imha aktif koruma sistemleri (APS), yaklaşan hedefleri tespit etmek için çoğunlukla radarları kullanmaktadır. Bunlardan bazıları radarlar ve optik kompozit dedektörlerdir. Çeşitli fotoelektrik, akustik sensörler ve diğer tespit yöntemleri kullanılır ve menzil onlarca metreden birkaç yüz metreye kadar uzatılabilmektedir. Ayrıca, birden fazla radarın eş zamanlı çalışmasıyla, Şekil 4'teki gibi 360° azimutta ölü bölge içermeyen tespit, 50°'den fazla menzilde eğim tespiti elde edilebilir. Kullanılan karşı saldırı önleme teknolojisi kabaca üç türe ayrılmaktadır: parçalanma/mermi tipi, patlayıcı tip ve güdümlü tip. Bunlardan parçalanma/mermi tipi, çoğunlukla havada patlayabilen veya doğrudan ateş ederek parçalanma önleme
duvarı oluşturabilen düşük kalibreli karşı saldırı füzeleri kullanmaktad



Şekil 4: Aktif koruma sistemi [16]

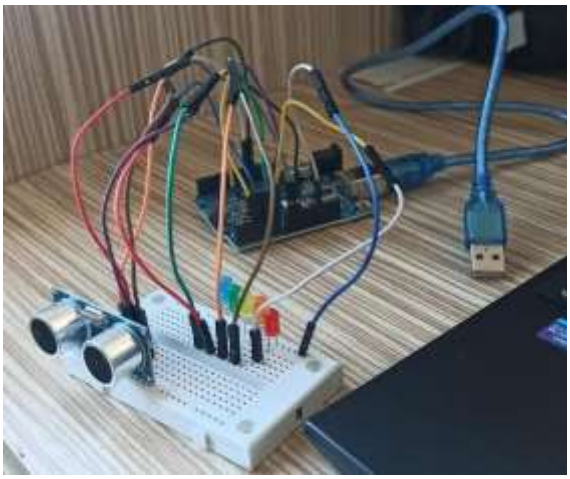
1.2 Elektronik Tank Koruma Sistemleri

Karıştırıcı imha (soft kill) sistemleri olarak tanımlanan elektronik karıştırıcı sistemleri; karşı önlemleri arasında kızılötesi karıştırıcılar, lazer nokta taklitçileri ve radar karıştırıcıları bulunmaktadır. Füze güdümünün Kara Muharebe Aracına (GCV) kilitlenmesini önlemekte, füzenin hedefi ıskalamasına neden olarak veya silah harp başlığının patlamasını önleyerek aracı koruyabilmektedirler. Ancak, karşı önlemlerin pratikte uygulanmasının zor olduğu kanıtlanmıştır çünkü belirli bir tehdide göre uyarlanmaları gerekmektedir; geniş bir tehdit yelpazesinde işe yarayacak bir şemsiye savunması değildirler. Örneğin, bir milimetre dalga radar karıştırıcısı, bir kızılötesi izleyiciye karşı etkili olmayacaktır. Ayrıca, karıştırıcılar şemsiye kapsama alanı (geniş bant veya baraj karıştırması) sağladığında, dost iletişim ve elektronik sistemler üzerinde olumsuz etkileri de olabilmektedir.[17] Bu nedenle elektronik tank koruma sistemleri tek başına yeterli olmamaktadır.

1. BENZETİM MODELİ

Benzetim modeli aşamasında tank koruması için mühimmat atılan (hard kill) savunma sistemi benzetim modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem anti tank sistemlerine karşı olan etkisi nedeniyle seçilmiştir. Yapılan benzetim modelinde anti tank füzelerinin tanka belirli bir mesafeye kadar yaklaştığında sistemin roketi algılayıp roketin mesafesi tankın zırhına etki edecek mesafeye gelmesine kadar takip edilip zırha zarar verecek mesafeye ulaştığı takdirde karşı patlayıcı tapa fırlatarak füzenin imha edilmesinin benzetim modeli yapılmıştır.

Benzetim modelinde sistem kontrolcüsü için projelerde kullanılan bilinen devre kartı kullanılmıştır. Kullanılan devre kartının işlem hızı tehdit modellemesi olarak insan kullanıldığı için yeterli gelmektedir. Tehdidin uzaklığı
ve aktif koruma sisteminin tepki menzili kullanılan mesafe dedektörünün menzili referans alınarak belirlenmiştir. Mesafe dedektörünün menzili 400 santimetredir. 400 santimetre modelleme alanı olan 250 santimetre için fazla büyük olduğundan 250 santimetre mavi led için maksimum sınır olarak belirlenmiştir. 250 santimetre üzeri tehditlerde hiçbir led yanmayarak risk olmadığını temsil etmektedir. 250 santimetre ile 90 santimetre arası daha uzak tehdit olduğu için az riskli bölge olan yeşil led ile belirlenmiştir. 90-60 santimetre aralığı daha riskli olduğu için sarı olarak belirlenmiştir. 60 santim ve altı yüksek risk içerdiği için 60-30 arası turuncu 30-0 arası kırmızı olacak şekilde en riskli bölgeleri belirtmektedir ve kırmızı led, tapanın müdahalesinin gerekli olduğu olduğu aralığı gösteren en yüksek riskli bölgeyi modellemektedir.



Şekil 5: Benzetim modellemesi

2. SONUÇLAR

Modelleme incelendiğinde savaş alanındaki tankı temsil eden sistem kullandığı mesafe sensörü sayesinde tehdidin mesafesini belirlemiştir. Renkli ledlerle modellemesi yapılan risk seviyeleri sayesinde tehdidin daha
önce kodlanan menzillere göre risk seviyeleri başarılı şekilde sistem tarafından gösterilmiştir. Tehdit riskli olarak tanımlanan mesafeye ulaştığında sistem kırmızı led yakarak tapanın fırlatılışını modellemiştir. Tanklarda kullanılan bu sistemin yine açık hedef olabilen uçaklarda, helikopterlerde ya da düşük hızlarından dolayı kara unsurlar tarafından hedef olabilecek seyir füzeleri için de gelişmiş ve ağırlığı düşürülmüş modellerinin geliştirilmesi mümkündür. Bu sistemler özellikle omuzdan fırlatılan füzeler için hava araçlarına da üstün koruma sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

[1] https://www.kkk.tsk.tr/kkksablonmaster/hea der/kurumsal/siniflar/tank.aspx

[2] https://tdefenceagency.com/altay tankinin- ozellikleri/

[3] https://urunler.mke.gov.tr/Urunler/120-mm Tank-M%C3%BChimmatlar%C4%B1/38/321

[4] https://www.savunmasanayist.com/anti- tank gudumlu-fuze-atgm/

[5] https://www.savunmasanayist.com/anti- tank gudumlu-fuze-atgm/

[6] Eric G. Berman; Jonah Leff; NR Jenzen- Jones (Nisan 2012)

[7] https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/16 08 904981_stm-trend-analizi-algila-sakinsistemlerin-tanksavar-fuze.pdf

[8] https://www.savunmasanayist.com/anti- tank gudumlu-fuze-atgm/

[9] https://www.army.mod.uk/equipment/av/av_str .htm

[10] Land, Jay; Jones, Michael; Carriger, Wendy (21 Ağustos 2006)

[11] https://www.savunmasanayist.com/anti- tank gudumlu-fuze-atgm/

[12] https://www.savunmasanayist.com/anti- tank gudumlu-fuze-atgm/

[13] https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1 608 904981_stm-trend-analizi-algilasakinsistemlerin-tanksavar-fuze.pdf

[14] [https://www.lockheedmartin.com/en us/products/javelin.html]

[15] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1 742-6596/1855/1/012034/pdf

[16] https://idstch.com/wpcontent/uploads/2017/06/trophyprotect2.jpg

[17] https://eurosd.com/2024/01/articles/36065/active protection-systems-an-overview/

AKILLI SAVUNMA SİSTEMLERİ: DİKKAT ARTIRILMIŞ YOLOV11 KULLANARAK SAR TABANLI UÇAK ALGILAMANIN GELİŞTİRİLMESİ

Murat BAKIRCI

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin,

Türkiye

mbakirci@uislab.org, muratbakirci@tarsus.edu.tr **(Sorumlu Yazar)** ORCID: 0000-0003-2092-1168

Behiye ŞAHİN

İnsansız/Akıllı Sistemler Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin,

Türkiye

behiye_sahin@tarsus.edu.tr ORCID: 0009-0001-9632-0644

Özet

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleme, gece gündüz ve her türlü hava koşulunda eşsiz yüksek çözünürlüklü görüntüleme yetenekleri sağladığı için uzaktan algılamada önemli bir teknik haline gelmiştir. SAR, uyarlanabilirliği sayesinde artık yer tabanlı uçak gözetlemesi gibi birçok hayati uygulama için vazgeçilmezdir. Karmaşık geometrik bozulmalar ve benek gürültüsü içeren SAR görüntülerinin karmaşıklığı, sağladığı avantajlara rağmen nesne tespit işlerinde ciddi engeller oluşturmaktadır. Sonuç olarak, gelişmiş nesne tespit algoritmaları artık SAR verilerinden faydalı sonuçlar çıkarmak için hayati önem taşımaktadır. YOLO ailesinin en yeni üyesi olan YOLOv11, bu çalışmada yerdeki uçakları tespit etmek için kullanılan son teknoloji bir nesne tanımlama algoritmasıdır. YOLOv11, yaygın tespit görevlerinde en son teknolojiyi gösterse de, entegre dikkat mekanizmalarının SAR görüntülerinin kendine özgü karmaşıklığını ele almak için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu kısıtlamayı aşmak için YOLOv11 boyun mimarisine Gelişmiş Kanal Dikkati (ECA) modülleri ekledik ve bu da önemli performans kazanımları sağladı. ECA ile geliştirilen YOLOv11, düşük çözünürlüklü senaryolarda (256x256 piksel) %3,4'e varan artışlar gösterdi; çeşitli giriş görüntü çözünürlüklerinde ortalama %1,7 hassasiyet artışı ve %2,3 mAP50 artışı elde edildi. Ayrıca, F1 puanı sürekli olarak %2,4'e varan artışlar göstererek, modelin geri çağırma ve hassasiyet arasında başarılı bir şekilde uzlaşma sağlama kapasitesini ortaya koydu. Bulgular, ECA modüllerinin SAR görüntüleriyle ilişkili zorlukları azaltmak için tespit sistemlerine nasıl entegre edilebileceğini ve zorlu görüntüleme senaryolarında daha doğru ve güvenilir uçak tespiti yapılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hava savunma sistemi, YOLOv11, SAR görüntüleme, uçak tespiti, derin öğrenme, evrişimli sinir ağı (CNN).

Giriş

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleme, uzaktan algılamada temel bir teknoloji haline gelmiş ve çok çeşitli uygulamalar için benzersiz yetenekler sunmuştur [1]. Optik görüntüleme sistemlerinin aksine, SAR mikrodalga spektrumunda çalışır ve bulutları, sisi ve karanlığı aşarak her türlü hava koşulunda, gündüz ve gece görüntüleme için idealdir [2]. Bu yetenek, olumsuz hava koşullarının veya düşük görüş mesafesinin geleneksel yöntemleri engelleyebileceği ortamların izlenmesi için özellikle önemlidir. Ayrıca, SAR sistemleri zorlu koşullarda bile yüzeylerin ve yapıların yüksek çözünürlüklü görüntülerini yakalayarak çevresel izleme, afet yönetimi ve askeri keşif gibi uygulamalar için değerli veriler sağlayabilir [3]. SAR'ın benzersiz görüntüleme mekanizması, ince yüzey değişikliklerinin tespit edilmesini de sağlayarak, karmaşık arazilerdeki hedeflerin belirlenmesi ve analiz edilmesinde önemli bir avantaj sağlar. Bu avantajlar, güvenilirlik ve doğruluğun çok önemli olduğu senaryolarda SARgörüntülerinin kullanılmasının gerekliliğini vurgular ve onu modern uzaktan algılamada vazgeçilmez bir araç haline getirir.

Bilgisayarlı görüde önemli bir alan olan nesne tespiti, son on yılda hızlı gelişmeler kaydetmiştir. Derin öğrenmedeki atılımların etkisiyle, nesne tespit algoritmaları giderek daha sağlam ve verimli hale gelmiş ve otonom araçlardan tıbbi teşhislere kadar çeşitli alanlarda kullanıma sunulmalarını sağlamıştır [4]. SAR görüntüleme bağlamında, nesne tespiti, karmaşık ve genellikle dağınık sahnelerde ilgi çekici nesnelerin tanımlanması ve analiz edilmesi için kritik bir araç görevi görür. Geleneksel optik görüntülerin aksine, SAR görüntüleri, doğru tespit için özel teknikler gerektiren benek gürültüsü ve düşük sinyal-gürültü oranları gibi benzersiz zorluklar sunar. En son teknoloji nesne tespit algoritmalarının SAR görüntülemeyle entegrasyonu, deniz gözetimi, afet müdahalesi ve hava izleme gibi uygulamalarda devrim yaratma potansiyeline sahiptir ve bu alandaki araştırmaların artan önemini vurgulamaktadır [5]. SAR görüntülemede yer tabanlı nesnelerin, özellikle de uçakların tespiti, uzmanlaşmış ancak hayati bir uygulamadır. Hangarlar, apronlar ve pistler dahil olmak üzere havalimanı ortamlarının dağınık ve genellikle karmaşık arka planı nedeniyle yerdeki uçaklar benzersiz tespit zorlukları sunar. Geleneksel tespit yöntemleri bir miktar başarı göstermiş olsa da, SAR görüntülerinin sağladığı yüksek çözünürlüklü, özellik açısından zengin verilerle başa çıkmada genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu durum, bu tür karmaşıklıklarla başa çıkabilen daha gelişmiş algoritmalara olan ihtiyacın altını çizmiştir.

YOLO nesne tespit algoritmaları serisi, benzersiz bir hız ve doğruluk kombinasyonu sunarak alanında lider bir çerçeve olarak kendini kanıtlamıştır [6, 7]. Her yinelemede, YOLO algoritmaları tespit performansını artıran yenilikçi özellikler sunarak onları gerçek zamanlı uygulamalar için son derece uygun hale getirmiştir. Bu aileye en son eklenen YOLOv11 [8], gelişmiş mimarisi ve gelişmiş özellik çıkarma yetenekleriyle önemli bir sıçramayı temsil etmektedir. YOLOv11, zorlu ortamlarda nesne tespitinin karmaşıklıklarını ele almak için modern teknikleri bünyesinde barındırırken, öncüllerinin güçlü yönlerini de geliştirmektedir. Bu çalışma, bu son teknoloji algoritmanın SAR görüntülerinde uçak tespiti için uygulanabilirliğini araştırmakta ve YOLOv11'i bu benzersiz bağlamda kullanan ilk çalışmalardan birini işaret etmektedir.

YOLO algoritmalarını kullanarak SAR görüntülerinden nesnelerin tespiti, hem bilimsel hem de

pratik uygulamalar için muazzam bir vaat sunmaktadır. Daha da önemlisi, YOLO algoritmalarını kullanarak SAR görüntülerinde yer tabanlı uçakların tespiti muazzam bir pratik öneme sahiptir. SAR görüntülerinde hedefleri doğru bir şekilde belirleme yeteneği, afet kurtarma, sınır güvenliği ve hava trafiği yönetimi gibi kritik senaryolarda durumsal farkındalığı büyük ölçüde artırabilir. YOLO algoritmalarının, özellikle de yeni tanıtılan YOLOv11'in güçlü özellik çıkarma yeteneklerinden yararlanarak, bu çalışma, gürültü ve karmaşık arka planlar gibi SAR görüntülerinin doğasında var olan zorlukları ele almayı ve bu yöntemlerin gerçek dünya senaryolarındaki pratik faydasını göstermeyi amaçlamaktadır. Dahası, bu senaryolarda tespiti iyileştirmek, uçak planlama ve kaynak tahsisi gibi operasyonel verimliliği desteklerken, güvenlik uygulamaları için kritik bilgiler sunar. SAR görüntüleme ve YOLOv11 gibi gelişmiş tespit algoritmaları arasındaki sinerji, bu araştırmanın önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, YOLOv11'in SAR görüntülerinde yer tabanlı uçakları tespit etme potansiyelini araştırıyor ve mimari değişikliklerle performansını artırmaya odaklanıyoruz. YOLOv11'in doğal dikkat mekanizmalarının sınırlamalarını göz önünde bulundurarak, algoritmanın boyun bölümündeki dört stratejik noktaya Verimli Kanal Dikkati (ECA) [9] modülleri entegre ettik. Bu geliştirme, özellikle havalimanı ortamlarına özgü karmaşık görsel ortamlarda tespit performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Sonuçlar, YOLOv11'in SAR tabanlı nesne tespiti için potansiyelini ortaya koymakta ve zorlu senaryolarda tespit doğruluğunu artırmak için dikkat mekanizmalarının entegre edilmesinin faydalarını vurgulamaktadır.

Veri Seti Hazırlama

Bu çalışmada kullanılan veri seti, çeşitli ortamlarda yerdeki uçakları tespit etmek için özel olarak hazırlanmış yüksek çözünürlüklü SAR görüntülerinden oluşmaktadır. Veri toplama ve ön işleme adımları, veri setinin gerçek dünya senaryolarını doğru bir şekilde temsil etmesini ve tespit modelinin sağlamlığını artırmak için çeşitli örnekler sunmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. SAR görüntüleri,

herkese açık veri setleri, askeri düzeydeki depolar (izin verilen yerlerde) ve özel olarak oluşturulmuş SAR simülasyonlarının bir kombinasyonundan elde edilmiştir. OpenSARShip ve Sentinel-1 görüntü arşivleri gibi herkese açık veri setleri, uçakların ilgili SAR görüntüleri için taranmıştır. Ayrıca, tıkanıklıklar ve yüksek gürültülü senaryolar da dahil olmak üzere çevresel koşulların kapsamını genişletmek için optik görüntülerde özel değişiklikler yapılarak simüle edilmiş SAR görüntüleri oluşturulmuştur. Birleştirilmiş veri seti, çeşitli çevresel ortamlar, uçak tipleri ve bağlamsal arka planlar arasında dengeli bir görüntü dağılımı sağlar.

Tüm SAR görüntüleri, yüksek kaliteli yer gerçeği verilerini sağlamak için manuel olarak ek açıklamalarla işaretlendi ve PASCAL VOC ek açıklama formatına uygun olarak LabelImg kullanılarak uçakların etrafına sınırlayıcı kutular çizildi. Ek açıklamalar, açık alanlarda veya pistlerde konumlanmış, apronların yakınında veya çevresinde karmaşık yapılar bulunan hangarların yakınında park etmiş, bitişikteki binalar veya dağınıklık nedeniyle kısmen gizlenmiş ve olumsuz görüntüleme koşullarını simüle etmek için yoğun veya gürültülü ortamlarda çekilmiş uçakları içerecek şekilde tasarlandı. Gerçekçi operasyonel ortamları simüle etmek için SAR görüntüleri, izole açık alanlarda veya önemli arka plan yapıları olmayan pistlerde bulunan uçaklar, yakınlarda araçlar ve destek ekipmanları bulunan yoğun apron ve hangar alanlarına park etmiş uçaklar, kara araçları ve kargo gibi ilgisiz nesnelerin yer aldığı dağınık arka planlar ve farklı hava koşulları, SAR gürültü profilleri ve aydınlatma açılarının

neden olduğu farklılıklar gibi çeşitli bağlamsal senaryoları kapsadı.

SAR görüntülerini standartlaştırmak, çözünürlük ve formatta tutarlılık sağlamak için ön işleme gerçekleştirildi. Model eğitimi sırasında sayısal kararlılığı sağlamak için piksel değerleri [0,1] aralığına normalleştirildi. Gerçek dünyadaki kusurları simüle etmek için, benek gürültüsü ve Gauss bulanıklığı gibi SAR'a özgü gürültü desenleri, görüntülerin bir alt kümesine eklendi. Ayrıca, görüntü netliğini artırmak ve özellik çıkarımını iyileştirmek için histogram eşitleme de dahil olmak üzere kontrast ayarlamaları uygulandı. Etkili eğitim, doğrulama ve test süreçlerini kolaylaştırmak için veri kümesi üç alt kümeye ayrıldı. Verilerin %73'ünü oluşturan eğitim kümesi, model öğrenimi için kullanıldı ve tüm bağlamsal senaryoların dengeli bir temsilini içeriyordu. Veri kümesinin %15'ini oluşturan doğrulama kümesi, eğitim sırasında modelin performansını izlemek ve aşırı uyumu önlemek için kullanıldı. Yine
%12'sini oluşturan test kümesi, nihai değerlendirme için özel olarak tasarlandı ve modelin gerçek dünyadaki uygulanabilirliğini değerlendirmek için karmaşık arka planlar, gürültülü görüntüler ve kısmen gizlenmiş uçaklar gibi zorlu durumlar içeriyordu.

Modelin sağlamlığını artırmak için eğitim kümesine kapsamlı veri artırma teknikleri uygulandı. Rastgele döndürmeler, çevirmeler ve ölçekleme gibi geometrik dönüşümler, uçak yönelimindeki değişiklikleri simüle etmek için kullanıldı. SAR'a özgü benek gürültüsü ve simüle edilmiş girişim desenleri gibi gürültü enjeksiyonu, radar görüntüleme eserlerini taklit etmek için kullanıldı. Uçakların diğer nesneler veya yapılar tarafından kısmen gizlendiği senaryoları çoğaltmak için tıkanıklık simülasyonu uygulandı. Farklı radar sinyal yoğunluklarını ve görüntüleme koşullarını hesaba katmak için parlaklık ve kontrast değişimleri de uygulandı. Veri setini doğrulamak ve eğitim için uygunluğunu sağlamak için bir kalite güvence süreci gerçekleştirildi. Farklı senaryolar arasında görüntülerin dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlamak için istatistiksel kontroller gerçekleştirildi. Açıklamaların doğruluğunu ve YOLOv11 veri hattıyla uyumluluğunu teyit etmek için ön model testleri gerçekleştirildi.

YOLOv11 Ağ Mimarisi

YOLOv11 çerçevesi, hem hesaplama verimliliğini hem de algılama doğruluğunu vurgulayarak nesne algılama mimarisinde önemli bir evrimi temsil eder. Önceki YOLO modellerindeki yenilikler üzerine inşa edilen YOLOv11, hızdan ödün vermeden özellik çıkarımını ve uzamsal bilgi işlemeyi geliştirmek üzere tasarlanmış C3K2, SPFF ve C2PSA modülleri de dahil olmak üzere yeni modüller sunar. YOLOv11'in omurgasının temel taşlarından biri olan C3K2 modülü, yapılandırılmış bir şekilde kompakt 3x3 evrişimli çekirdekler kullanarak özellik çıkarma yaklaşımını geliştirir. Önceki modellerde kullanılan geleneksel CSP bloklarının aksine, C3K2 özellik haritalarını bölmekten kaçınır, ancak bunları birleştirmelerle serpiştirilmiş bir dizi darboğaz katmanında sırayla işler. Bu tasarım, sağlam özellik temsilini korurken hesaplama yükünü azaltır. Sıralama, ilk bir evrişim katmanıyla başlar, ardından birden fazla hafif darboğaz işlemi gelir ve son bir evrişim katmanıyla sonlanarak özelliklerin katmanlar arasında verimli bir şekilde toplanmasını sağlar. Bu yaklaşım, YOLOv8'in C2f yapısına kıyasla

Dikkat ağırlıkları w, daha sonra kanal bazında çarpma yoluyla orijinal özellik haritası F'ye uygulanarak yeniden kalibre edilmiş özellik haritası $\hat{F}$ üretilir:

$$\hat{F}_{c,i,j} = w_c \cdot F_{c,i,j}$$

$$c = 1,2, \dots, C \; , i = 1,2, \dots, H \; , j = 1,2, \dots, W$$

Bu işlem, en alakalı özellik kanallarını vurgulayarak ağın gereksiz bilgileri göz ardı ederken belirgin örüntülere odaklanma yeteneğini artırır.azaltılmış parametre sayısı ve geliştirilmiş temsil arasında bir denge sağlar. C3K2 modülü, hem giriş hem de çıkış aşamalarında çift evrişimsel katmanlar sunar. İlk evrişimsel katman ve terminal C3K2'den gelen çıktılar birleştirilir ve son bir evrişimsel işlemden geçirilir. Bu kurulum, ağ genelinde geliştirilmiş özelliklerin yayılmasını iyileştirerek algılama hızı ve doğruluğu arasında daha incelikli bir denge sağlar. Derinlik bazında ayrılabilirlik ile verimli çekirdek yönetimini birleştirerek C3K2, gerçek zamanlı senaryolarda karmaşık görsel bilgileri işlemek için optimize edilmiştir. SPFF modülü, farklı boyutlardaki nesneleri algılama zorluğunu ele almak için uzamsal havuzlamayı çok ölçekli özellik toplama ile bütünleştirir. Bu modül, küçük nesnelerden büyük nesnelere kadar bağlam açısından zengin ayrıntıları yakalayarak, birden fazla ölçekte uzamsal bilgileri yoğunlaştırmak için çeşitli çekirdek boyutlarına sahip bir dizi maksimum havuzlama işlemi kullanır. Önceki piramit havuzlama uygulamalarının aksine, SPFF, havuzlama işleminin hesaplama akışını optimize ederek yüksek hızlı çıkarım için tasarlanmıştır. Farklı çözünürlüklerdeki özellikleri birleşik bir gösterime dahil ederek, SPFF, büyük ölçüde farklı boyutlardaki nesnelerin bulunduğu senaryolarda ağın sağlamlığını garanti eder.

ECA Mekanizmasının Entegrasyonu

YOLOv11'in performansını daha da artırmak için, ECA mekanizmasını mimarisine entegre ettik. Verimli Kanal Dikkati (ECA), önemli özellik kanallarını uyarlamalı olarak vurgularken alakasız olanları bastırarak evrişimli sinir ağlarının (CNN'ler) performansını artırmak üzere tasarlanmış bir dikkat mekanizmasıdır. Parametre yoğun işlemlere dayanan geleneksel dikkat mekanizmalarının aksine, ECA, boyutsal azaltmaya gerek kalmadan kanal bazında bağımlılıklardan yararlanarak hafif ancak etkili bir kanal dikkat stratejisi sunar.

ECA'da temel amaç, her kanal için dikkat ağırlıklarını hesaplayarak kanal bazında özellik yanıtlarını yeniden kalibre etmektir. C'nin kanal sayısı, H ve W'nin özellik haritasının yüksekliğini ve genişliğini temsil ettiği bir $F \in \mathbb{R}^{C\times H\times W}$ özellik haritası için ilk adım, $z \in \mathbb{R}^{C}$ kanal tanımlayıcısını elde etmek için uzamsal bilgileri toplamayı içerir. Bu, küresel ortalama havuzlama yoluyla aşağıdaki gibi elde edilir:

$$z_c = \frac{1}{H \times W} \sum_{i=1}^{H} \sum_{j=1}^{W} F_{c,i,j} \quad , c = 1,2, \dots , C$$

Burada z_c, c^{th} kanal için toplanmış uzamsal bilgidir.

Boyutsallığı azaltmak ve genişletmek için tamamen bağlı katmanlar kullanan geleneksel kanal dikkat mekanizmalarının aksine, ECA kanal bağımlılıklarını yakalamak için hafif bir 1D evrişimsel işlem sunar. Özellikle, $w \in \mathbb{R}^{C}$ dikkat ağırlıkları, z'nin k boyutunda 1D evrişimsel bir çekirdekle evrişimlenmesiyle hesaplanır:

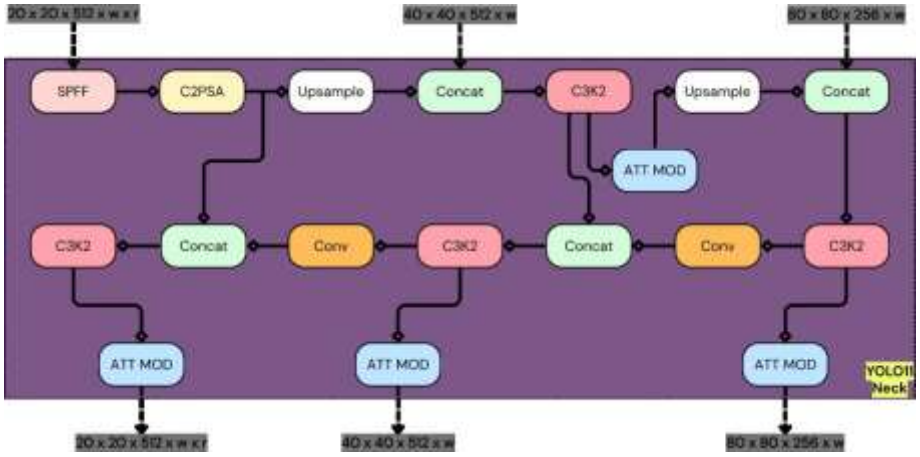
$$w_c = \text{Conv1D}(z_c, k) , c = 1,2, \ldots C$$

Çekirdek boyutu k, kanal etkileşimlerinin kapsamını belirlemede kritik bir rol oynar. k'yi sabit bir hiperparametre olarak ele almak yerine, ECA, k'yi kanal sayısı C'ye göre şu formülü kullanarak adaptif olarak belirler:

$$k = \boldsymbol{\phi}(C) = \log_2(C) + 1$$

$\phi(C)$, çekirdek boyutunun C ile logaritmik olarak artmasını sağlayarak, mekanizmanın önemli bir hesaplama yükü getirmeden yerel kanal bağımlılıklarını verimli bir şekilde yakalamasına olanak tanır.

ECA, tamamen bağlı katmanlara ve boyutsallık azaltımına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak parametre sayısını ve hesaplama karmaşıklığını önemli ölçüde azaltır. 1 boyutlu evrişim işlemi, mekanizmanın kanal bazlı bağımlılıkları yakalamada yüksek etkinliğini korurken ihmal edilebilir düzeyde ek yük oluşturmasını sağlar. Bu verimlilik, ECA'yı özellikle hafif modellere ve İHA platformlarında SAR görüntü işleme gibi kaynak kısıtlı ortamlara entegrasyon için uygun hale getirir.



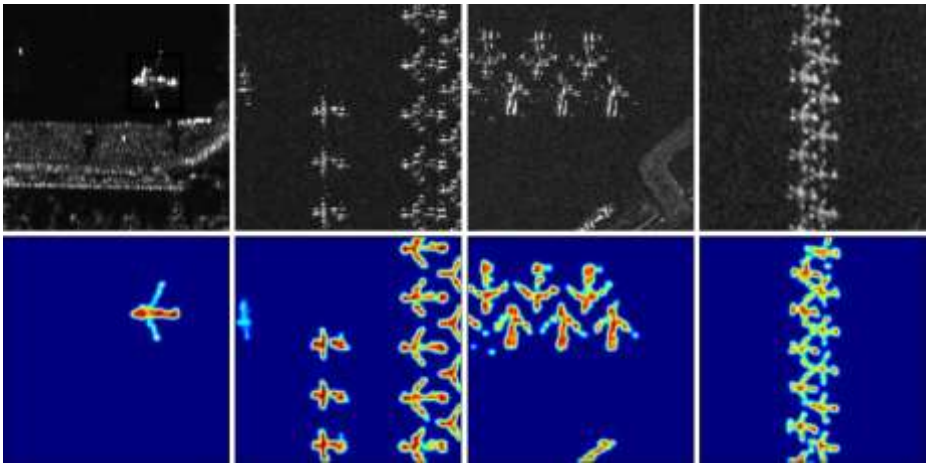
Şekil 1. YOLOv11 algoritmasındaki Boyun bölümünün mimarisi, algılama performansını artırmak için dört stratejik noktaya Verimli Kanal Dikkati (ECA) modüllerinin entegrasyonunu göstermektedir. İlk ECA modülü, ilk C3K2 modülünden hemen sonra konumlandırılırken, diğer üçü mimarinin sonraki aşamalarında ardışık olarak sonraki C3K2 modüllerini takip eder. Modüller, 80x80x256xw, 40x40x512xw ve 20x20x512xwxr olmak üzere farklı boyutlarda özellik haritalarını işler ve bunlar nihai algılama için Baş bölümüne iletilir.

Şekil 1, YOLOv11 algoritması içindeki Boyun bölümünün mimarisini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, ECA modülleri, algoritmanın nesne algılama performansını artırmak için Boyun mimarisinin dört farklı noktasına stratejik olarak entegre edilmiştir. Bu eklemelerin temel amacı, özellikle zorlu algılama senaryolarında, algoritmanın daha az alakalı bilgileri bastırırken temel özelliklere odaklanma yeteneğini artırmaktır. İlk ECA modülü, mimaride erken bir iyileştirme katmanı görevi görerek, ilk C3K2 modülünün hemen ardından yer alır. Kalan üç ECA modülü, ilgili C3K2 modüllerini doğrudan takip edecek şekilde sonraki aşamalara sırayla yerleştirilir. Bu modüller, değişen uzamsal boyutlardaki çıktıları işlemekle görevlidir: ilki, Baş bölümüne 80x80x256xw boyutunda bir özellik haritası çıktısı verir, ikincisi 40x40x512xw boyutunda bir özellik haritası çıktısı verir ve üçüncüsü 20x20x512xw boyutunda

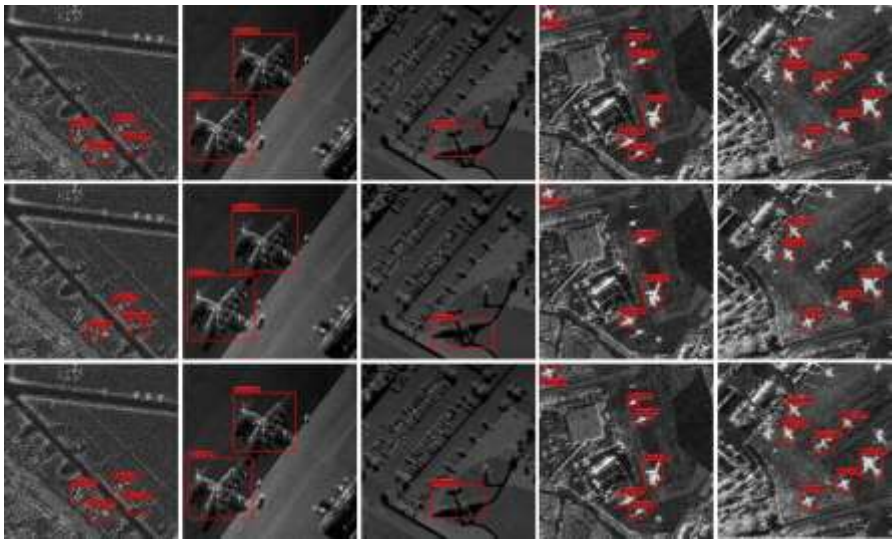
bir özellik haritası üretir. Tüm bu çıktılar, son algılama katmanlarının bulunduğu sonraki Baş ağına beslenir. ECA mekanizmasının dahil edilmesi, düşük kontrast, gürültü ve belirsiz nesne sınırları gibi genellikle benzersiz zorluklar sunan SAR görüntülerinin işlenmesi için özellikle faydalıdır. ECA modüllerinin dikkat tabanlı tasarımından yararlanarak, Boyun bölümü, doğru nesne tespiti için kritik olan özelliklere öncelik verebilir ve bu zorlu koşulların etkisini etkili bir şekilde azaltabilir. Bu geliştirmenin, YOLOv11 algoritmasının, en uygun olmayan görüntüleme senaryolarında bile daha yüksek tespit doğruluğu elde etmesini sağlaması ve böylece SAR görüntülerinin sıklıkla kullanıldığı gerçek dünya problemlerine uygulanabilirliğini genişletmesi bekleniyor.

Bulgular

Şekil 2, YOLOv11'in boyun mimarisine ECA modülleri entegre edilerek elde edilen gelişmiş tespit performansını vurgulayan görsel bir karşılaştırma sunmaktadır. Üst satır, havaalanları ve askeri üsler gibi ortamlarda çekilmiş, yere indirilmiş uçakların SAR görüntülerini içermektedir. Görüntüler, sahnelerin karmaşık doku ve geometrik özelliklerini göstererek, arka plan karmaşası ve yapısal benzerlikler nedeniyle uçakları çevrelerinden ayırt etmede karşılaşılan doğal zorlukları ortaya koymaktadır. Şekil 2'nin alt satırı, entegre ECA mekanizması kullanılarak oluşturulan dikkat odaklı görselleştirmeleri sergilemektedir. Görüntülerde görüldüğü gibi, ilgi alanları, özellikle de uçakların konumları, belirgin renk yoğunluklarıyla vurgulanmaktadır. Bu geliştirme, uçağı arka plandan etkili bir şekilde izole ederek konumlarını daha belirgin hale getirir. Dikkat mekanizması, hesaplama kaynaklarını kritik alanlara odaklayarak alakasız arka plan bilgilerini bastırır ve nesne sınırlarının netliğini artırır. Bu yaklaşım, uçakların, aksi takdirde kimliklerinin belirlenmesini engelleyebilecek yakındaki yapılardan veya dokulardan net bir şekilde ayırt edilebilmesi sayesinde görsel yorumlanabilirlik ve tespit doğruluğunda belirgin bir iyileşme göstermektedir. YOLOv11 mimarisine ECA modüllerinin eklenmesi, ısı haritalarındaki artan netlik ve uçaklara odaklanma ile kanıtlandığı gibi, bu sonuçlara doğrudan katkıda bulunmaktadır. Bu iyileştirme, özellikle ince görsel ayrımların yakalanması gereken zorlu senaryolarda, değiştirilmiş algoritmanın SAR verilerindeki mekansal bağımlılıkları daha iyi işleme kapasitesini vurgulamaktadır.



Şekil 2. ECA modüllerinin YOLOv11'in boyun mimarisine entegre edilmesinden önce ve sonra SAR görüntü algılama performansının görsel karşılaştırması. Üst satır, çeşitli ortamlardaki yere indirilmiş uçakların SAR görüntülerini göstermektedir. Alt satır, ECA mekanizması aracılığıyla oluşturulan ve ısı haritalarına benzeyen, dikkati artıran görselleştirmeleri sunmaktadır. Görüntülerde, uçak konumları belirgin renk yoğunluklarıyla vurgulanarak, görünürlükleri ve arka plandan ayırt edilebilirlikleri önemli ölçüde artırılmıştır.



Şekil 3. Orijinal YOLOv11 ve ECA mekanizmasıyla geliştirilmiş YOLOv11 kullanılarak SAR görüntülerinde uçak tespit sonuçları. Üst satır, uçağın konumlarının sınırlayıcı kutular kullanılarak manuel olarak işaretlendiği ve tespit performansı için referans noktaları olarak kullanılan yer gerçeği açıklamalarını göstermektedir. Orta satır, aynı SAR görüntü kümesine uygulanan orijinal YOLOv11 sonuçlarını göstermektedir. Alt satır ise, YOLOv11'in ECA mekanizmasıyla geliştirildiği durumdaki tespit sonuçlarını göstermektedir.

Şekil 3, çeşitli yöntemler kullanılarak farklı uçak tespit sonuçlarını gösteren beş ayrı SAR görüntüsünden oluşan bir küme sunmaktadır. Her satır, aynı SAR görüntü kümesine farklı tespit yaklaşımlarının uygulanmasını göstermektedir. Üst satırda, her biri sınırlayıcı kutularla elle işaretlenmiş uçakların bulunduğu beş görüntü gösterilmektedir. Bu sınırlayıcı kutular, görüntülerdeki uçakların tam konumlarını belirten yer gerçeği açıklamaları olarak işlev görür

ve tespit algoritmalarının doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır. Orta satır, orijinal, değiştirilmemiş YOLOv11 algoritması kullanılarak uçak tespitinin sonuçlarını göstermektedir. Bu satırdaki sonuçlar, orijinal YOLOv11 algoritmasının belirli uçakları tespit edemediğini açıkça göstermektedir. Bazı uçakları tespit edememe, orijinal algoritmanın SAR verilerine uygulandığında sağlamlığındaki sınırlamaları düşündürmektedir. Buna karşılık, alt satır, ECA mekanizmasının eklenmesiyle güçlendirilmiş, geliştirilmiş YOLOv11 kullanılarak uçak tespitinin sonuçlarını sunmaktadır. Geliştirilmiş model, SAR görüntülerinde neredeyse tüm uçakların doğru bir şekilde tanımlanmasıyla tespit performansında önemli bir iyileşme göstermektedir. ECA mekanizması, algoritmanın dikkatini uçakların bulunduğu bölgelere etkili bir şekilde odaklayarak karmaşık arka planlarda uçak tespitini iyileştiriyor gibi görünüyor. Bu iyileştirme, özellikle orijinal YOLOv11'in uçakları tespit edemediği durumlarda belirginleşiyor. ECA destekli YOLOv11 modelinden elde edilen sonuçlar, mekanizmanın modelin SAR görüntülerinde uçak tespit etme yeteneğini önemli ölçüde geliştirerek hem doğruluğunu hem de genelleme kapasitesini artırdığını gösteriyor.

Sonuç

Bu çalışma, Verimli Kanal Dikkati (ECA) mekanizmasını mimarisine entegre ederek YOLOv11 nesne algılama algoritmasına bir geliştirme önerdi. Amaç, arka plan karmaşası ve nesneler arasındaki yapısal benzerlikler gibi SAR verilerinin doğasında bulunan karmaşıklık nedeniyle zorlu bir görev olan Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntülerinden yerdeki uçakları algılamada algoritmanın performansını iyileştirmekti. Bu araştırmanın sonuçları, ECA mekanizmasının YOLOv11'in çeşitli giriş görüntü çözünürlüklerinde algılama yeteneklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. ECA modüllerinin YOLOv11 mimarisine entegrasyonu, hassasiyet, geri çağırma, mAP@50, mAP@75, mAP@50:95 ve F1 puanı dahil olmak üzere temel performans metriklerinde kayda değer iyileştirmeler sağladı. Kazanımlar daha küçük görüntü çözünürlüklerinde en belirgindi ve geliştirilmiş modelin sınırlı mekansal ayrıntıya sahip görüntülerdeki kritik özelliklere odaklanma yeteneğinin altını çizdi. Temel YOLOv11 modelinin zaten iyi performans gösterdiği daha yüksek çözünürlüklerde bile, ECA mekanizmasının dahil edilmesi, tespit performansında tutarlı, ancak daha küçük iyileştirmelere yol açtı. Bu, ECA ile geliştirilmiş modelin sağlamlığını ve farklı görüntü ayrıntı düzeyleri arasında etkili bir şekilde genelleme yapma kapasitesini göstermektedir. Nitel ve nicel analizler, ECA mekanizmasının hem SAR görüntülerinin görsel yorumlanabilirliğini hem de nesne tespitinin doğruluğunu iyileştirmedeki avantajlarını vurgulamaktadır. Dikkat mekanizması, alakasız arka plan bilgilerini etkili bir şekilde bastırır ve hesaplama odağını ilgi alanlarına yönlendirerek modelin uçakları karmaşık çevrelerden ayırt etme yeteneğini artırır. Bulgular, özellikle havaalanı güvenliği, askeri gözetim ve hava trafik yönetimi gibi hassas ve güvenilir performans gerektiren uygulamalarda, SAR tabanlı nesne tespit görevleri için önemli çıkarımlara sahiptir.

Referanslar

[1] Zhang, T., Zhang, X., Li, J., Xu, X., Wang, B. et al., "SAR Ship Detection Dataset (SSDD): Official Release and Comprehensive Data Analysis," Remote Sensibg, vol. 13, no. 3690, 2021.

[2] Singh, P. et al., "A Review on SAR Image and its Despeckling," Arch. Computat. Methods Eng., vol. 28, pp. 4633–4653, 2021.

[3] Yasir, M., Jianhua, W., Mingming, X. et al., "Ship detection based on deep learning using SAR imagery: a systematic literature review," Soft Computing, vol. 27, pp. 63–84, 2023.

[4] Kaur, R., Singh, S., "A comprehensive review of object detection with deep learning," Digital Signal Processing, vol. 132, no. 103812, 2023.

[5] Gromada, K., Siemiątkowska, B., Stecz, W., Płochocki, K., Woźniak, K., "Real-Time Object Detection and Classification by UAV Equipped With SAR," Sensors, vol. 22, no. 2068, 2022.

[6] Bakirci, M., Bayraktar, I., "The Cutting-Edge YOLO11 for Advanced Aircraft Detection in Synthetic Aperture Radar (SAR) Imagery," 2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS), İstanbul, Turkiye, 2024, pp. 1-6.

[7] Zhang, J., Peng, J., Kong, X., Deng, L., OBrien, E.J., "Vision-based identification of tire inflation pressure using Tire-YOLO and deflection," Measurement, vol. 242, no. 116228, 2025.

[8] Jocher, G., Qiu, J., "Ultralytics YOLO11," https://github.com/ultralytics/ultralytics, 2024.

[9] Wang, Q., Wu, B., Zhu, P., Li, P., Zuo, W. et al., "ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks," Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 11534-11542.

DNA-BASED DATA STORAGE IN SPACE MISSIONS: A MINI REVIEW OF CURRENT APPROACHES AND CHALLENGES

Beyza ÖZTÜRK

Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, İstanbul - Türkiye **(**Corresponding Author) ORCID: 0009-0002-0759-6479

Ayşenur İGİT

Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Software Engineering, İstanbul - Türkiye ORCID: 0009-0008-4956-6001

Aylin KAYA

Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical-Electronics Engineering, İstanbul - Türkiye ORCID: 0009-0001-0359-0902

Zeynep Tuğsem ÇAMLICA

Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Software Engineering, İstanbul - Türkiye ORCID: 0009-0003-7752-7142

Selen ARICI

Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Molecular Biology and Genetics, İstanbul - Türkiye ORCID: 0009-0008-9594-3138

Muhammed Faruk ŞAHİN

Research Assistant, Istanbul Atlas University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, İstanbul - Türkiye **(**Corresponding Author) ORCID: 0009-0007-8901-6410

ABSTRACT

In recent years, the growing interest in national space research has intensified the need for sustainable space exploration, protection of data privacy, and the development of reliable data storage solutions. However, traditional digital storage systems such as Solid State Drive (SSDs) and hard disk enclosures face significant challenges in the space environment, including data corruption caused by cosmic radiation, high energy consumption due to cooling requirements, large physical space demands, thermal degradation, and various other harsh environmental conditions unique to space. In addition, the increasing prevalence of cyber threats and the heightened confidentiality requirements of intelligence operations conducted in space necessitate solutions that go beyond conventional approaches. DNA-based methods, a relatively novel research area in the literature, have been proposed as a promising alternative for secure and long-term data storage in space. With a theoretical capacity of up to 215 petabytes, DNA offers superior resilience to radiation and extreme temperatures compared to current storage technologies, positioning it as a highly advantageous medium for preserving large-scale data in extraterrestrial settings. These attributes make DNA-based storage an ideal alternative for safeguarding critical information and archiving data in long-term space

missions. Beyond long-term storage capabilities, the inherent cryptographic properties embedded in DNA sequences enable data to be stored in formats that are accessible only by authorized systems, thereby enhancing data security. This mini review aims to evaluate the current status and future potential of DNA-based data storage technologies in the context of space applications. Additionally, it addresses key issues such as read/write speed, cost, and existing limitations, and discusses how emerging approaches can contribute to overcoming these challenges.

Keywords: DNA data storage, Space data systems, Data preservation, Molecular computing, Cryptographic data encoding.

1.GİRİŞ

Son yıllarda, uzay ortamında sürdürülebilir yaşam alanlarının kurulması üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır (Holzhauer, 2012). Dünya dışı yaşam, kolonileşme çalışmaları olarak hız kazanırken üretilen verilerin güvenli bir şekilde depolanması ve iletilmesi kritik bir gereklilik haline gelmektedir (Hylton vd., 2019). Ancak, Katı Hal Sürücüleri (SSDs) , geleneksel veri kasaları ve çeşitli geleneksel dijital veri depolama sistemlerinin maruz kaldığı radyasyon (Katti, 1994), aşırı sıcaklık, fiziksel aşınma ve uzay ortamının kendine özgü zorlu koşulları sebebiyle ciddi sınırlamalar bulunmaktadır (Tan & Osborne, 2017), (Wang vd., 2024). Bu durum, uzun vadeli, dayanıklı ve güvenli sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ek olarak, uzaydaki varlığın artmasıyla birlikte savunma sanayiinde de stratejik öneme sahip veri setlerinin güvenli, dayanıklı ve müdahaleye kapalı biçimde korunması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Özellikle askeri uydular, radar sistemleri ve otonom savunma platformlarında görev kritik verilerin bozulmadan saklanması ve gerektiğinde hızlı biçimde erişilebilir olması, ulusal güvenlik açısından hayati öneme sahip olmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında uzay ortamında yaşanılan sorunlara yenilikçi bir çözüm sağlamak amacıyla DNA tabanlı dijital veri depolama sistemlerinin kullanılması önerilmektedir (Buko vd., 2023), (Panda vd., 2018).

DNA depolama sistemleri, bilinen literatürde yapılan çalışmalar kapsamında yüksek veri depolama kapasitesine sahip olması, ekstrem koşullara karşı dayanıklılığı ve DNA'nın bölünebilme yeteneği sayesinde verilerin kolaylıkla çoğaltılması avantajlarını sunmaktadır (De Silva & Ganegoda, 2016), (Baek vd., 2024), (Liu vd., 2022). Ayrıca, DNA'nın doğal yapısı gereği uzun vadede bozulmadan kalabilme potansiyeli, verilerin gelecek nesillere en az bozulma ile aktarılmasını mümkün kılarken DNA depolama yöntemi düşük enerji sarfiyatı ile büyük verileri uzun süreli saklayarak yüksek enerji tasarrufu sağlayacağı öngörülmektedir (*Perspectives of Cybersecurity Risks in DNA Data Storage Environment - ProQuest*, t.y.). Ek olarak, DNA dizilimi içinde yer alan kriptografik yapı ile verilerin sadece yetkili sistemler tarafından erişilebilir ve çözümlenebilir hale gelmesi sağlanmaktadır (Gomola vd., 2025). Bu bağlamda, DNA'nın uzay kolonileri için veri saklama amacıyla kullanılmasının sürdürülebilirlik ve güvenlik açısından kritik avantajlar sağlaması beklenmektedir.

1.1 MOTİVASYON VE KATKI

Uzay keşfinin artmasıyla birlikte sürdürülebilir yaşam ve savunma alanlarında çalışmalar giderek önem kazanmakta ve kritik sınırlamaları sebebiyle geleneksel sistemler bu ihtiyaçlara

karşılık verememektedir. Bu mini derleme çalışması, mevcut literatürü sistematik olarak sentezlemeyi ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, bu alanlardaki zorlukları ve sınırlamaları belirleyecek ve bu ortamda DNA tabanlı yaklaşımların avantajlarını ve dezavantajlarını kapsamlı bir şekilde analiz edecektir. Bu analizler ışığında, bu incelemenin araştırmacıların DNA tabanlı veri depolama sistemlerine genel bir bakış açısıyla daha etkili çözümler geliştirmelerini sağlayacağı öngörülmektedir. Çalışmamızın benzersiz katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

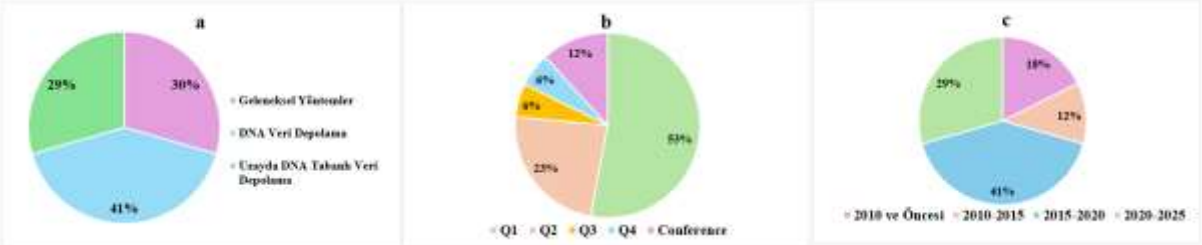
- Bu araştırma, uzay keşfi, havacılık, uzay ve diğer ilgili alanlar dahil olmak üzere çeşitli alanlarda karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmede DNA tabanlı yöntemlerin önemini vurgulamaktadır.
- DNA tabanlı veri depolama yöntemlerinin güçlü ve zayıf yönleri, alandaki hakim sorunlarla birlikte incelenmektedir.
- Çalışma, sektördeki kritik engelleri belirleyerek bu zorlukları çözmedeki etkinliğini inceleyerek akademisyenlere temel içgörüler sunmaktadır.

2. UZAY ORTAMI VERİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Son yıllarda, uzay ortamı keşfinin artmasıyla birlikte sürdürülebilir yaşam ve askeri faaliyetler için kullanımın artmasıyla veri depolama ihtiyacı artmaktadır. Bu ihtiyaç nedeniyle DNA tabanlı depolama sistemleri günümüz araştırmalarının odağında yer almaktadır. Bu bölümde, DNA tabanlı depolama sistemlerinin geleneksel yaklaşımları geliştirmek amacıyla kullanıldığı çalışmalara odaklanılmaktadır ve derlenen çalışmalar Tablo 1'de özetlenmektedir.

2.1. DERLENEN ÇALIŞMALARA DAİR İSTATİKSEL VERİLER

Bu derleme çalışmasında toplam 17 bilimsel yayın detaylı olarak incelenmektedir. Bu yayınlar, DNA tabanlı veri depolama, uzay ve geleneksel yöntemlerdeki alanlarını kapsamaktadır. Uygulama alanlarına göre incelendiğinde, yayınların %41'i DNA veri depolama, %30'u geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlar ve %29'u uzayda DNA temelli veri depolama uygulamaları üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu dağılım, DNA'nın yüksek yoğunluklu, uzun ömürlü ve çevresel koşullara karşı dirençli yapısının, özellikle veri depolama alanında öne çıkan bir alternatif haline geldiğini göstermektedir. Yıllara göre dağılım incelendiğinde ise yayınların %18'inin 2010 ve öncesine, %12'sinin 2010–2015 dönemine, %41'inin 2015–2020 dönemine ve %29'unun 2020–2025 dönemine ait olduğu görülmektedir. Bu bulgular, özellikle 2015 sonrası dönemde konunun akademik ilgisinin belirgin biçimde arttığını ortaya koymaktadır. İndeks türlerine göre yapılan sınıflandırmada, çalışmaların %53'ünün Q1 seviye dergilerde yayımlandığı, %23'ünün Q2, %6'sının Q3 ve Q4 seviyesinde yer aldığı görülmektedir. Ayrıca %12'lik bir kısmın ise uluslararası konferanslarda sunulduğu görülmektedir. Bu durum, DNA tabanlı veri depolama konusunun hem yüksek etki faktörlü dergilerde hem de akademik etkinliklerde dikkat çekici bir düzeyde ele alındığını göstermektedir.



Şekil 1. a) Derlenen çalışmaların dağılımı, b) indeks türlerine göre dağılım, c) yıllara göre dağılım.

2.2. GELENEKSEL YÖNTEMLER

Günümüzde dijital verilerin uzun yıllar boyunca bozulmadan saklanması büyük bir problem teşkil etmektedir (Grass vd., 2015). Geçmişten günümüze bu probleme çözüm sağlamak adına manyetik, optik ve SSDs da dahil olmak üzere çeşitli geleneksel depolama teknolojileri geliştirilmektedir. Bu yöntemlerden uzun vadeli arşivleme için kullanılan bant belleklerinin hacminin 330 terabayta kadar ulaştığı bilinmektedir (Grass vd., 2015),(Patel, 2017). Ancak, bu belleklerde bant okuma ve yazma sırasında bandın fiziksel olarak sarılması, bloklar arasında arama ve erişimi yavaşlatarak sınırlamalara sebep olmaktadır. Daha büyük kapasiteye sahip modeller ise oldukça maliyetli olarak nitelendirilmektedir. Son yıllarda üretilen verilerin depolama hacminin ise günümüz teknolojisinde ihtiyaç duyulan veri miktarı hacmini aştığı dikkat çekmektedir. Bu artışın 2040 yılına kadar 3×10^{24} bite kadar çıkabileceği ve depolama araçlarının üretimi sırasında kullanılan silikon arzını aşabileceği araştırmacılar tarafından tahmin edilmektedir (Zhirnov vd., 2016).

Geleneksel depolama yöntemlerinden ilk olarak manyetik bant (~10 GB/mm³) ve yüksek yoğunluklu manyetik disk (~100 GB/mm³) depolama olarak en yoğun yöntem olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca dayanıklılık açısından manyetik diskler 3-5 yıl, manyetik bantlar ise 10-30 yıl veri saklayabilmektedir (Bornholt vd., 2016). SSD ve manyetik bant sürekli enerjiye ihtiyaç duyan sistemler olması sebebiyle veri merkezlerinde yüksek enerji tüketimi ve önemli soğutma maliyetleri gerektirmektedir. Manyetik bantlar, enerji verimliliği sunmasına rağmen içerik erişimi sırasında hız ve dayanıklılık sorunları içermesi sebebiyle arşiv verilerinin depolanmasında fiziksel alan ve enerji maliyeti oluşturmaktadır. Bu sorunu iyileştirmek için yeni SSD, Shingled Manyetik Kayıt (SMR) ve Açık Lineer Manyetik Teyp (LTO) bant depolama yöntemleri önerilmesine rağmen hala büyük miktardaki kullanılabilir veriyi koruma talebini karşılamada yetersiz kalmaktadır (Sensintaffar vd., 2025). Dahası, mevcut depolama yöntemleri kısıtlı bir ömre sahip olmakta ve genellikle birkaç yıl sürmektedir. Uzun vadeli korumayı sağlamak amacıyla veriler sürekli olarak yeni depolama sürücülerine aktarılmaları gerekmektedir. Bu nedenle, yalnızca yüksek depolama kapasitesi değil aynı zamanda uzun süreli kalıcılık da sağlayan alternatif depolama teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Verileri depolama, yalnızca yeryüzündeki uygulamalarla sınırlı kalmayıp uzay görevlerinde de ihtiyaç haline gelmektedir. Uzayda elde edilen görüntü, bilimsel, çevresel ve telemetri verilerinin farklı oran ve zamanlarda toplanması, bu verilerin güvenilir biçimde iletilebilmesi için gelişmiş bir ara bellekleme sistemi gerektirmektedir. Bu sebeple, manyetik bant sistemlerinin sınırlamaları yarı iletken sistemlere geçilmede önünün açılmasına sebep olmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda, dünyadan üretilen veriye ek olarak uzay ortamında elde edilen görüntü, bilimsel, çevresel ve telemetri verilerinin farklı oran ve zamanlarda toplanması, bu verilerin güvenilir biçimde iletilebilmesi için gelişmiş bir ara bellekleme sistemi gerektirmektedir. Bu sebeple, manyetik bant sistemlerinin sınırlamaları yarı iletken sistemlere geçilmede önünün açılmasına sebep olmaktadır. Yarı iletken sistemler düşük güç tüketimi, maliyet etkinliği ve çeşitli avantajlar sunarken fiziksel mekanik parçalara sahip olmaları nedeniyle arıza riski taşımaktadırlar. Bu durumu iyileştirmek için geliştirilen Bir Kez Yaz, Sonsuza Kadar Oku (WORF) teknolojisiyle gerçekleştirilen HELIOS sistem deneyleri uzaydaki depolama araçlarının bozulma riskini iyileştirmektedir. Buna ek olarak, radyasyona dayanıklılık, yüksek güvenlik, enerji gereksiniminin düşük olması ve uzun ömrü ile ön plana çıkmaktadır. Ancak, yazma işlemi karmaşık ve yavaş olmakla beraber özel ekipman da gerektirmektedir. Ayrıca, depolanan veri silinememekte veya güncellenememektedir. Bu yüzden geri dönüştürülebilir ve değiştirilebilir veri kullanımları için dezavantajı bulunmaktadır.

Geleneksel dijital bellekler, uzaydaki radyasyon ve diğer zorlu koşullara karşı hassas olmaktadır. Bu durum, veri kaybı, görev iptali ve astronot güvenliği açısından ciddi riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle uzun ömürlü, güvenli ve dayanıklı veri depolama çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Solomon vd., 2021). Herhangi bir depolama ortamının ömrü, o ortamın bulunduğu çevresel faktörlerden ve kullanıldığı sıklıktan doğrudan etkilenir. Fakat, Geleneksel depolama teknolojileri, veri üretiminin patlayıcı artışı karşısında kapasite, ömür ve erişilebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. Geleneksel yöntemler her ne kadar kısa süreli ve az maliyetli olsa bile uzun vadede veri depolama, sınırlı veri kapasite, ömür ve erişilebilirlik açısından geliştirilmeye çalışılan yöntemlerin üretilen veri miktarı karşısında yetersiz kaldığı görülmektedir.

2.3. DNA VERİ DEPOLAMA

Bu kısımda DNA tabanlı veri depolama yönteminden bahsedilmekte ve Şekil 2 de özetlenmektedir. Son yıllarda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte üretilen verilerin depolama talebinin her geçen gün katlanarak arttığı görülmektedir (Church vd., t.y.). Manyetik disklerin ve bantların sınırlı kullanım ömürleri dikkate alındığında teorik olarak çok daha uzun süreli saklama kapasitesi sunan DNA tabanlı veri depolama yöntemleri, mevcut yarı iletken tabanlı bellek depolama birimlerine kıyasla yaklaşık 10^3 kat daha yüksek veri yoğunluğu (bit/mm^3) ve 10^8 kat daha düşük enerji tüketimi (J/bit) ile önemli avantajlar sunmaktadır (Zhirnov vd., 2016). Geleneksel dijital depolama sistemlerinin özellikle uzay ortamındaki radyasyon ve ekstrem çevre koşullarından kaynaklanan veri bozulmalarına sebebiyet verdiği bilinmektedir (Solomon vd., 2021). Geleneksel depolama yöntemlerinin bu dezavantajları göz önüne alındığında depolama amacıyla daha verimli ve geleceğe yönelik uzun vadeli depolama yöntemlerine

başvurulmasının oluşan depolama arzını önemli ölçüde karşılayabileceği öngörülmektedir. DNA veri depolama işleminin mekanizması günümüz verilerinin yapı taşı olarak bilinen 0 ve 1'den oluşan ikili formattaki dijital bilgilerin, DNA'nın depolama birimi olan Adenin (A), Timin (T), Guanin (G) ve Sitozin (C) nükleotitlerine atanmasıyla başlamaktadır. Bu süreç sırasında, öncelikle gizlenecek olan veriler ikili formata dönüştürülmektedir. Elde edilen ikili formattaki dijital veriler DNA nükleotidlerinin harflerine atanarak şifrelenmektedir. Örneğin, 00 A'yı, 01 T'yi, 10 G'yi ve 11 C'yi temsil eden her bir nükleotide ikili sistemde karşılık gelecek bir değer atanmaktadır (Buko vd., 2023). Atama işleminin ardından, depolama işlemi için dijital verinin ikili kodları ilgili nükleotide denk gelecek şekilde yerleştirilerek sentetik bir DNA zinciri elde edilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen DNA zincirinin doğal yöntemlerle sekanslanmasıyla veya Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) ile veri fiziksel olarak yazılmaktadır. Bilgiyi geri alma aşamasında ise DNA dizisinin sekanslanmasıyla veriler tekrar ikili formata dönüştürülerek depolanan veri geri alınmaktadır (Meiser vd., 2020). Bu yöntem en temel anlamda DNA depolama mantığı olarak bilinmektedir. İn vivo olarak adlandırılan bu kodlama yönteminin yetersizlikleri üzerine yöntemin iyileştirilmesine yönelik yenilikçi keşifler gerçekleştirilmeye odaklanılarak yöntemin verimliliğini artıracak, maliyetini düşürecek farklı algoritmalar ve kodlama şemaları geliştirilmeye devam edilmektedir (Risca, 2001).

Bilinen literatürde, DNA'nın üç boyutlu yapısı ve yaklaşık 10^{19} bit/cm^3 düzeyinde yoğunlukta bulunması, 1 gram DNA'nın yaklaşık 215 petabayt veri saklayabileceği belirtilmektedir (Buko vd., 2023), (Risca, 2001). PCR veya hücresel replikasyon yoluyla kolayca çoğaltılabilmesi, düşük enerjiyle çalışması ve uygun koşullarda uzun süre dayanabilmesi, DNA'yı uzun vadeli arşivleme için ideal hale getirmektedir (Heinis vd., 2023). Bu yenilikçi yöntem avantajlarının yanında dezavantajlar da barındırmaktadır. Başlıca problemlerinden biri veri depolama maliyeti olarak nitelendirilmektedir. 1 MB veri depolama alanı başına yaklaşık 3500 ABD dolarına mal olmaktadır. Araştırmacılar bu dezavantaja karşı maliyeti azaltmak adına geleneksel A, C, G ve T bazlarına ek olarak 11 adet "degenerate base" (karışık baz) kullanarak, her nükleotitte taşınan bilgi miktarı 2.00 bit/nt'den 3.90 bit/nt'ye çıkarılmakta olup bu yöntem kullanılarak aynı miktarda veri daha kısa DNA dizilerine sığdırılarak yazım maliyeti %50 oranında azaltılmaktadır (최영재, 2018). Ayrıca dizileme sırasında gönderilen mesajı bozabilecek veri bozulmaları oluşabilmektedir. Veri bozulma oranlarını iyileştirmek adına araştırmacılar "DNA Fountain" isimli bir kodlama tekniği geliştirerek başlangıçta 1 hata/256 bit olan genel hata oranını 1 hata/3.3 kilobit oranına çekerek %92.2 yüksek oranda iyileşme sağladıkları dikkat çekmektedir (Xu vd., 2025). Buna ek olarak DNA'ya rastgele ve tekrar erişim sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar 200 MB büyüklüğündeki dijital veriyi 13 milyon sentetik DNA oligonükleotidine kodlayarak her bir dosyaya özgü 25 nükleotidlik primer bölgeleri tanımlamaktadır. Belirli bir dosyaya erişmek için yalnızca o dosyaya özgü primer çifti ile PCR uygulamaktadır. Bu sayede büyük veri havuzu içerisinden hedef veri parçalarının seçici olarak çoğaltılması amaçlanmaktadır. Yöntem geçmiş DNA depolama yöntemlerine kıyasla yaklaşık 10 ila 100 kat daha büyük ölçekte rastgele erişim başarısı göstermektedir (Organick vd., 2018). DNA'nın çevresel koşullara karşı hassasiyeti arşivleme açısından risk teşkil etmektedir. Araştırmacılar çalışmada 83 kB büyüklüğündeki

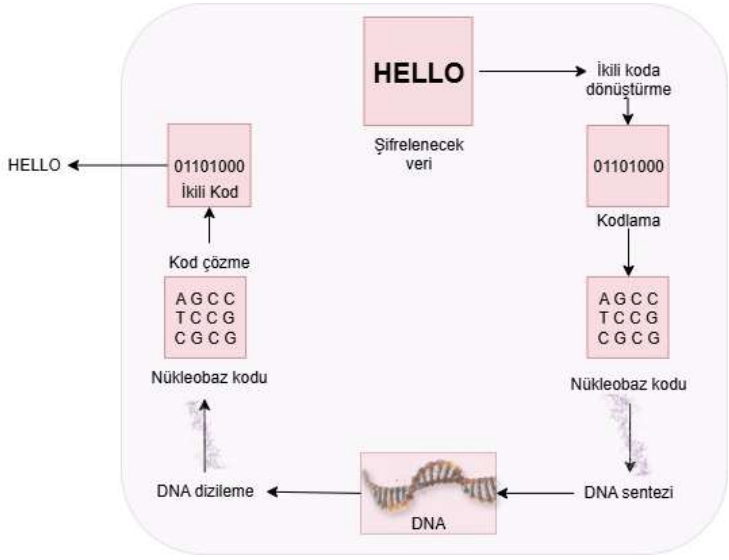
metin verisini 4991 adet 158 nükleotidlik kısa DNA dizisine dönüştürerek bu dizileri silika matris içine kapsülleyecek şekilde saklayarak, çevresel faktörlerden korunmasını sağlamaktadırlar. Hızlandırma testleri kapsamında 70 °C'de bir hafta boyunca muhafaza edilen DNA, 2000 yıl saklamaya eşdeğer bozulma yaşamasına karşın içerisindeki veriler hatasız olarak geri alınmaktadır (Grass vd., 2015).

Son yıllarda veri setlerinin yetkisiz erişime karşı korunmasız kalması, verilerin gizlenmesinin ve güvenli şekilde iletilmesinin öneminin artmasıyla birlikte DNA tabanlı kriptografi ve steganografi yöntemlerinin mevcut açıkları kapatmada etkili olabileceği düşünülmektedir (Heinis vd., 2023). Bu kapsamda, DNA tabanlı şifreleme sisteminde veri önce sıkıştırılarak iletim hızının arttırılması ile birlikte DNA'nın dört bazı kullanılarak geleneksel sayı tabanlı tekniklere kıyasla daha güvenli bir yapı sunulması amaçlanmaktadır. Ek olarak, DNA içerisine gizlenen mesaj yalnızca doğru primer dizisi (anahtar) ile geri okunabildiğinden, veri gizliliği klasik dijital steganografiye göre daha zor tespit edilebilir hale getirilmektedir (Risca, 2001). Ancak yöntem herhangi bir saldırganın primer dizisine erişmesi ile birlikte gizliliğini yitirmektedir. Olası saldırganların primere erişmesini zorlaştırmak adına CRISPR/Cas12a Destekli DNA Steganografisi (CADS) yöntemi önerilmektedir. Yöntem kapsamında gerçek primerleri sahte primerlerle karıştırarak bir "ön anahtar" üretilmekte ve Cas12a/crRNA kompleksi ile sadece gerçek primerleri koruyup sahte olanlar yok edilmektedir. Böylece, veri sadece Cas12a/crRNA kombinasyonu ile işlenebilir hâle gelmekte ve hem veri saklama hem de aktarım süreçlerinde kullanılan DNA tabanlı veri depolama yöntemlerine kıyasla %200 ile %300 arası güvenlik artışı sağlanmaktadır (Li vd., 2018). DNA tabanlı veri depolama yöntemlerinin, yüksek yoğunluklu veri depolama kapasitesi, enerji verimliliği, uzun ömürlülük ve çevresel dayanıklılık açısından avantajlar sunduğu araştırmalar neticesinde ortaya konmaktadır (Buko vd., 2023). Ayrıca Reed-Solomon ve çeşitli ileri düzey hata düzeltme kodlarıyla sistemler daha da geliştirilebilmektedir (Li vd., 2018). Literatürde çalışmalarına yeni başlanmış olan bu alan giderek ilgi çekmekte ve gelecekte yalnızca 1 kg DNA'nın 2040 yılına tüm küresel veri ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahip olabileceği ifade edilmektedir (Zhirnov vd., 2016). Tüm bu durumlar göz önüne alındığında geleneksel yöntemler yerine DNA tabanlı veri depolama yöntemlerinin uzay ortamında kullanılmasının hem verimlilik hem de maliyet açısından uzun vadede büyük kazançlar sağlayacağı beklenmektedir.

Tablo 1. Derlenen Çalışmaların Özet Tablosu

Kriter	Geleneksel Yöntemler	DNA Tabanlı Yöntem	İyileştirme	Kaynaklar
Veri Yoğunluğu (bit/mm³)	~10^6 (SSD)	~10^9 (DNA)	10^3 kat ↑	[15], [21], [22]
Saklama Süresi	5–15 yıl (SSD)	>1000 yıl (DNA)	~200 kat ↑	[22], [23]
Hata Oranı	1 hata / 256 bit	1 hata / 3.3 kb (DNA Fountain)	%92.2 iyileşme	[13]

Rastgele Erişim	Yüksek	PCR + primer ile seçici erişim	10–100 kat ↑	[22]
Çevresel Dayanıklılık	Zayıf (radyasyon, sıcaklık)	Silika kapsüllemede 70°C'de bile bozulmaz	2000 yıl eşdeğeri koruma	[22]
Şifreleme Güvenliği	Dijital saldırıya açık	DNA + primer korumalı (CADS ile)	%200–300 güvenlik ↑	[21], [26]
Hata Düzeltme	Temel hata kontrolü	DNA Fountain, Reed–Solomon gibi tekniklerle daha iyi	Daha gelişmiş	[13], [15]
Uzay Ortamına Uygunluk	Yetersiz (radyasyona duyarlı)	Silika kapsül + DNA kombinasyonu ile dayanıklı	Avantajlı	[15], [18], [22]
Arşivleme Kapasitesi	1 TB = ~10^{12} bit	1 gr DNA = ~215 PB = 1.72×10^{17} bit	~10^{5} kat ↑	[22], [23]



Şekil 1. DNA Tabanlı Veri Depolama Genel Gösterimi.

2.4. UZAYDA DNA TABANLI VERİ DEPOLAMA

Son yıllarda dijital verinin hacmi her yıl katlanarak artmakta ancak mevcut manyetik ve optik depolama ortamları bu büyüyen ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Manyetik diskler ve diğer geleneksel depolama araçları, mekanik aşınma ve arızalanma risklerinin yanı sıra, veri yoğunluğunda da fiziksel sınırlarla karşı karşıya kaldığı görülmektedir. Ayrıca, arşivlenen bilgilerin sürekli yeni nesil donanımlara aktarılması gerekliliği, beraberinde ek maliyet ve iş yükü getirmektedir. Ortam koşullarına bağlı hasarlar ise uzun süreli veri saklamayı güçleştirmektedir (Bornholt vd., 2016). Bu durum, özellikle sınırlı kaynaklar ve zorlu çevre koşullarının hakim olduğu uzay görevlerinde geleneksel depolama sistemlerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu noktada DNA, bilinen en yoğun veri depolama ortamı olarak dikkat çekmektedir. Teorik olarak bir gram DNA, yaklaşık 215 petabayt veri saklayabilme kapasitesine sahip olmakta ve bu değerin geleneksel manyetik disklerin depolama kapasitesinin çok üzerinde olduğu bilinmektedir (Katti, 1994). DNA tabanlı veri depolama yöntemi, yüksek kapasiteli arşivleme için sürdürülebilir, çevre dostu ve enerji tasarruflu bir çözüm sunmaktadır.

Uzay ortamı ise kendine özgü zorlukları beraberinde getirmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon DNA origami nano yapılarının bütünlüğünü tehdit etmektedir. Bu hasar mekanizmalarının incelenmesi DNA nanoyapılarının radyasyona karşı dayanıklılığını artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Ameixa vd., 2025). DNA ise yüksek hacimsel depolama yoğunluğu ile uzaydaki sınırlı alan sorununa çözüm sağlamaktadır. Verilerin güç kesildiğinde kaybolmaması, radyasyona karşı duyarsız olması ve düşük güç tüketimi ve çeşitli özellikleri, uzay araçlarında veri güvenliğini önemli ölçüde arttırmaktadır (Katti, 1994). Ayrıca DNA tabanlı veri depolama yöntemi, uzay görevleri için yeterli veri aktarım hızına sahip olup, gelişmiş ara bellekleme özellikleri sayesinde veri akışının düzenli ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Geleneksel elektronik bellek sistemlerinin kozmik radyasyon, güneş parçacığı ve çeşitli etkenlere karşı savunmasız olması, kritik görev yazılımlarının bozulmasına ve görev kesintilerine yol açarken, DNA tabanlı sistemler, çok daha dayanıklı bir alternatif sunmaktadır. Bu sayede yüksek bütçeli uzay görevlerinin riske atılması önlenirken, astronotların güvenliği de artırılmış olmaktadır.

DNA tabanlı veri depolama yöntemi, uzayda bilgi saklamak adına geleceğin yenilikçi ve umut vaat eden bir çözümü olarak ön plana çıkmaktadır. Minyatür hacminde devasa veri saklama kapasitesi, enerji verimliliği ve uzun ömürlülüğü sayesinde Mars görevleri, uydular veya derin uzay arşivleri uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır (Church vd., t.y.). Ancak uzayın yüksek iyonlaştırıcı radyasyon ortamı, DNA yapılarının bozulma riskini artırmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla, radyasyona karşı olağanüstü dayanıklılığı ile bilinen Deinococcus radiodurans bakterisinin mekanizmalarından ilham alınarak, DNA nanoyapılarının radyasyona karşı korumasını artırmaya yönelik biyomimetik stratejiler geliştirilmektedir. Deinococcus radiodurans, DNA onarım mekanizmaları ve antioksidan savunma sistemleri sayesinde radyasyonun yol açtığı hasarları etkili biçimde tamir edebilmektedir (Cox & Battista, 2005). Bu sayede yapay veri depolama sistemlerine adapte edilmesi, uzaydaki zorlu koşullarda veri bütünlüğünün korunması mümkün hale gelmektedir. Böylece DNA tabanlı veri depolama sistemleri, sadece yüksek depolama yoğunluğu ve enerji verimliliği değil, aynı zamanda

radyasyona karşı üstün direnç kazandırılarak, uzun vadeli ve güvenilir bilgi saklama yöntemleri haline gelmesi öngörülmektedir.

3. SONUÇ

Bu derleme çalışması kapsamında, güncel olarak kullanılan uzayda veri depolama yöntemlerinin ve güncel yöntemlere alternatif olarak kullanılabilecek DNA tabanlı veri depolama yönteminin pozitif ve negatif durumları incelenmektedir. Literatürdeki araştırmalar; veri yoğunluğu, uzun süreli veri depolama ve çevresel etkenlere karşı dayanıklılık ve çeşitli avantajları sebebiyle DNA tabanlı veri depolama yöntemini önermektedir. Yöntem her geçen gün artan çalışmalar ışığında hem mali açıdan hem verimlilik bakımından diğer yöntemlere alternatif olarak bilim dünyasında öne çıkmaktadır. Ayrıca, siber saldırıların ve elektromanyetik müdahalelerin arttığı günümüzde, DNA veri depolama sistemlerinin biyolojik tabanlı ve fiziksel izolasyona elverişli yapısı sayesinde, bu tür tehditlere karşı daha dirençli olması beklenmektedir. Bu avantajlara karşın, veriyi DNA'ya işlemedeki yöntemlerin pratikte verimlilik ve hız yetersizlikleri olsa da gelecekteki çalışmaların bu teknolojinin uygulanabilirliğine katkı sağlamaya devam edeceği öngörülmektedir. Sonuç olarak, DNA tabanlı veri depolama yöntemi, insanlığın uzaydaki bilgi mirasını koruma konusunda yeni fırsatlar sunmakta ve uzun vadeli veri güvenliği için yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, bilinen literatürde oldukça yeni bir alan olması nedeniyle özgün ve yüksek potansiyele sahip bir araştırma konusu olmaktadır. Özellikle savunma ve uzay gibi stratejik öneme sahip alanlarda mevcut sınırlamaların aşılması adına bu teknolojiye yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir. Bu mini derleme çalışması, ilgili teknolojinin hem bilimsel hem de operasyonel düzeyde daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Ancak mevcut literatür incelendiğinde, bu alanda hâlâ çok sayıda açık problem ve teknik sınırlama olduğu görülmektedir. Bu nedenle, gelecek çalışmalarda aşağıdaki hususlara odaklanılması önerilmektedir:

- DNA veri depolama teknolojilerinin zorlu çevre koşullarında (örneğin radyasyon, sıcaklık değişimleri) kararlılığına yönelik deneysel araştırmaların artırılması,
- Askeri ve uzay uygulamalarına uygun, kompakt ve entegre DNA okuma/yazma sistemlerinin geliştirilmesi,
- Veri güvenliği, doğruluk ve uzun süreli saklama maliyeti konularında standartların belirlenmesi,
- Mevcut geleneksel veri depolama sistemleriyle karşılaştırmalı performans analizlerinin yapılması.

Bu doğrultuda, araştırmacıların konuya disiplinlerarası bir yaklaşımla eğilmeleri ve yeni prototiplerin geliştirilmesine yönelik iş birliklerine öncelik vermeleri büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

Ameixa, J., Sala, L., Kocišek, J., & Bald, I. (2025). Radiation and DNA Origami Nanotechnology: Probing Structural Integrity at the Nanoscale. *ChemPhysChem*, *26*(1), e202400863. https://doi.org/10.1002/cphc.202400863

Baek, D., Joe, S.-Y., Shin, H., Park, C., Jo, S., & Chun, H. (2024). Recent Progress in High-Throughput Enzymatic DNA Synthesis for Data Storage. *BioChip Journal*, *18*(3), 357-372. https://doi.org/10.1007/s13206-024-00146-2

Bornholt, J., Lopez, R., Carmean, D. M., Ceze, L., Seelig, G., & Strauss, K. (2016). A DNA-Based Archival Storage System. *SIGPLAN Not.*, *51*(4), 637-649. https://doi.org/10.1145/2954679.2872397

Buko, T., Tuczko, N., & Ishikawa, T. (2023). DNA Data Storage. *BioTech*, *12*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/biotech12020044

Church, G. M., Gao, Y., & Kosuri, S. (t.y.). *Next-Generation Digital Information Storage in DNA*.

Cox, M. M., & Battista, J. R. (2005). Deinococcus radiodurans—The consummate survivor. *Nature Reviews Microbiology*, *3*(11), 882-892. https://doi.org/10.1038/nrmicro1264

De Silva, P. Y., & Ganegoda, G. U. (2016). New Trends of Digital Data Storage in DNA. *BioMed Research International*, *2016*(1), 8072463. https://doi.org/10.1155/2016/8072463

Gomola, A., Kristensen, S. D., & Utne, I. B. (2025). Multi-level risk classification of distributed embedded software failures for autonomous systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 1748006X241309170. https://doi.org/10.1177/1748006X241309170

Grass, R. N., Heckel, R., Puddu, M., Paunescu, D., & Stark, W. J. (2015). Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes. *Angewandte Chemie International Edition*, *54*(8), 2552-2555. https://doi.org/10.1002/anie.201411378

Heinis, T., Sokolovskii, R., & Alnasir, J. J. (2023). Survey of Information Encoding Techniques for DNA. *ACM Comput. Surv.*, *56*(4), 107:1-107:30. https://doi.org/10.1145/3626233

Holzhauer, B. (2012, Haziran 11). Protecting mission data against loss. *SpaceOps 2012 Conference*. SpaceOps 2012, Stockholm, Sweden. https://doi.org/10.2514/6.2012-1263870

Hylton, A., Raible, D., & Clark, G. (2019). A Delay Tolerant Networking-Based Approach to a High Data Rate Architecture for Spacecraft. *2019 IEEE Aerospace Conference*, 1-10. https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742135

Katti, R. R. (1994). Space data storage systems and technologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, *30*(6), 4194-4199. IEEE Transactions on Magnetics. https://doi.org/10.1109/20.334033

Li, S.-Y., Liu, J.-K., Zhao, G.-P., & Wang, J. (2018). CADS: CRISPR/Cas12a-Assisted DNA Steganography for Securing the Storage and Transfer of DNA-Encoded Information. *ACS Synthetic Biology*, *7*(4), 1174-1178. https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00074

Liu, Q., Yang, K., Xie, J., & Sun, Y. (2022). DNA-Based Molecular Computing, Storage, and Communications. *IEEE Internet of Things Journal*, *9*(2), 897-915. IEEE Internet of Things Journal. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3083663

Meiser, L. C., Antkowiak, P. L., Koch, J., Chen, W. D., Kohll, A. X., Stark, W. J., Heckel, R., & Grass, R. N. (2020). Reading and writing digital data in DNA. *Nature Protocols*, *15*(1), 86-101. https://doi.org/10.1038/s41596-019-0244-5

Organick, L., Ang, S. D., Chen, Y.-J., Lopez, R., Yekhanin, S., Makarychev, K., Racz, M. Z., Kamath, G., Gopalan, P., Nguyen, B., Takahashi, C. N., Newman, S., Parker, H.-Y., Rashtchian, C., Stewart, K., Gupta, G., Carlson, R., Mulligan, J., Carmean, D., … Strauss, K. (2018). Random access in large-scale DNA data storage. *Nature Biotechnology*, *36*(3), 242-248. https://doi.org/10.1038/nbt.4079

Panda, D., Molla, K. A., Baig, M. J., Swain, A., Behera, D., & Dash, M. (2018). DNA as a digital information storage device: Hope or hype? *3 Biotech*, *8*(5), 239. https://doi.org/10.1007/s13205-018-1246-7

Patel, P. (2017). Three advances make magnetic tape more than a memory [News]. *IEEE Spectrum*, *54*(10), 9-11. https://doi.org/10.1109/MSPEC.2017.8048824

Perspectives of Cybersecurity Risks in DNA Data Storage Environment—ProQuest. (t.y.). Geliş tarihi 17 Mart 2025, gönderen https://www.proquest.com/openview/c57b72d002056d5cca95bfe1bf0e0e77/1?cbl=18750&diss=y&pq-origsite=gscholar

Risca, V. I. (2001). Dna-Based Steganography. *Cryptologia*, *25*(1), 37-49. https://doi.org/10.1080/0161-110191889761

Sensintaffar, A., Wei, Y., Ou, L., Du, D., & Li, B. (2025). Advancing Archival Data Storage: The Promises and Challenges of DNA Storage System. *ACM Trans. Storage*. https://doi.org/10.1145/3723166

Solomon, R. J., Rosenthal, E., Grubbs, R., & Solomon, B. D. (2021). Next Generation Big Data Storage For Long Space Missions. *2021 IEEE Aerospace Conference (50100)*, 1-7. https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438408

Tan, J., & Osborne, B. (2017). ANALYSIS OF BIG DATA FROM SPACE. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLII-2-W7*, 1367-1371. ISPRS Geospatial Week 2017 (Volume XLII-2/W7) - 18–22 September, Wuhan, China. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-1367-2017

Wang, S., Mao, X., Wang, F., Zuo, X., & Fan, C. (2024). Data Storage Using DNA. *Advanced Materials*, *36*(6), 2307499. https://doi.org/10.1002/adma.202307499

Xu, X., Wang, W., & Ping, Z. (2025). Biotechnological tools boost the functional diversity of DNA-based data storage systems. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, *27*, 624-630. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2025.02.002

Zhirnov, V., Zadegan, R. M., Sandhu, G. S., Church, G. M., & Hughes, W. L. (2016). Nucleic acid memory. *Nature Materials*, *15*(4), 366-370. https://doi.org/10.1038/nmat4594

최영재. (2018). *High Information Capacity and Low Cost DNA-based Data Storage through Additional Encoding Characters* [Thesis, 서울대학교 대학원]. https://s-space.snu.ac.kr/handle/10371/143143

KLASIK KONTROL YÖNTEMLERININ TEK SERBESTLIK DERECELI HELIKOPTER DENEY KITI ÜZERINDE UYGULANMASI VE SAVUNMA SANAYISINDEKI YERI

Yiğit Emre Göktaş
Lisans Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri – Türkiye
1140110447@erciyes.edu.tr (Sorumlu Yazar)
ORCID: 0009-0004-9733-103X

Leyla Özbek
Lisans Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri – Türkiye
1140110424@erciyes.edu.tr
ORCID: 0009-0005-8357-1232

Şükriye Nur Güngör
Lisans Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Kayseri – Türkiye
1140110450@erciyes.edu.tr
ORCID: 0009-0004-6206-5261

Abstract

Bu çalışmada, Acrome firmasına ait tek serbestlik dereceli (1-DoF) helikopter deney kiti üzerinde PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sistemin CAD modeli CATIA yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Ardından fiziksel yapıya uygun olarak sistemin hareket denklemleri çıkarılmış ve bu denklemler üzerinden transfer fonksiyonu elde edilmiştir. PID kontrolör tasarımı, elde edilen model temel alınarak gerçekleştirilmiş ve Simulink ortamında uygulanmıştır. Tasarlanan PID yapısına ek olarak PI ve PD kontrolör yapıları da modellenmiş, karşılaştırmalı analiz sonucunda PID kontrol yapısının sistem üzerinde en uygun performansı sağladığı belirlenmiştir. Çalışmanın önemi, yalnızca eğitim amaçlı bir deney setiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda savunma uygulamalarında önem taşıyan kararlılık, konumlama doğruluğu ve manevra kabiliyeti gibi konular için temel düzeyde bir altyapı sağlayabilmesinde yatmaktadır. Bu bağlamda elde edilen bulgular, ileri düzey kontrol yöntemleri ve daha karmaşık çok serbestlik dereceli sistemlerin geliştirilmesi için bir başlangıç niteliğindedir.

Keywords: PID kontrol, helikopter deney kiti, savunma sanayi.

Giriş

Helikopter gibi doğrusal olmayan sistemlerin[1] uçuş sırasında kararlı bir şekilde hareket etmesini sağlamak, hava araçlarının kontrol sistemlerinde üzerinde sıkça çalışılan temel problemlerden biridir. Gerçek bir helikopter üzerinde bu tür çalışmaların gerçekleştirilmesi hem maliyetli hem de karmaşık olduğundan, eğitim ve araştırma amaçlı geliştirilen deney

kitleri bu süreçte önemli rol oynamaktadır. Bu proje kapsamında, yalnızca dikey eksende serbestçe hareket edebilen Tek Serbestlik Dereceli (1-DoF) bir helikopter deney kiti kullanılarak, temel bir kontrol algoritması olan oransal-türev-integral (PID) kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerinde uygulanan PID kontrol yaklaşımı ile helikopter kitinin hedeflenen konuma kısa sürede, minimum salınım kararlı bir şekilde ulaşması hedeflenmiştir. Savunma sanayiide hava araçları sistemlerinin güvenilir ve hassas kontrolü kritik bir öneme sahiptir. Dikey ve sabit pozisyon kontrolü gerektiren keşif, gözetleme ve hedef izleme görevlerinde, PID gibi temel kontrol algoritmalarının anlaşılması ve test edilmesi, daha karmaşık otonom sistemlerin geliştirilmesi için temel bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, düşük maliyetli deneysel bir düzenek üzerinden gerçekleştirilen bu çalışma, eğitim alanında kontrol dinamiklerinin anlaşılmasına katkı sunarken; savunma uygulamalarına yönelik araştırmalarda da temel bir yaklaşım geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Materyal ve Yöntemler

Hava araçlarının uçuş güvenliği, manevra kabiliyeti ve görev başarımı açısından kararlı ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi büyük önem taşımaktadır[2]. Bu gereklilik, özellikle keşif, gözetleme, hedef takibi ve lojistik destek gibi kritik görevlerde kullanılan hava araçları için hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle, havacılık sistemlerinde kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve test edilmesi, mühendislik çalışmalarının temel alanlarından biridir. Ancak bu tür algoritmaların doğrudan gerçek bir helikopter üzerinde test edilmesi; yüksek maliyet, karmaşık sistem dinamikleri ve güvenlik riskleri gibi birçok zorluk içermektedir. Bu bağlamda, laboratuvar ortamında kullanılan düşük maliyetli deney kitleri, kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve test edilmesi için uygun bir çözüm sunmaktadır. Savunma sanayii Ar-Ge süreçlerinde, bu tür kitler sayesinde yüksek riskli ve maliyetli prototip testlerinden önce algoritmaların güvenilirliği ve performansını etkin bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Helikopter test yatakları, kontrol teorisinin hem eğitimde hem de araştırmalarda uygulanabilirliğini göstermek amacıyla uzun süredir kullanılan deneysel platformlardır. Bu sistemler farklı serbestlik derecelerinde tasarlanarak hem doğrusal hem de doğrusal olmayan dinamiklerin incelenmesine imkân tanımaktadır. Özellikle 1-DoF sistemler, yalnızca dikey eksende (pitch ekseni) hareket edebilen ve tek rotorla çalışan yapıları sayesinde düşük karmaşıklık seviyesine sahip olup, temel kontrol algoritmalarının uygulanması ve sistem tepkilerinin analiz edilmesi açısından ideal platformlardır. Bununla birlikte, bu sistemlerde dahi istenen konumlara hızlı ve kararlı biçimde ulaşabilmek için uygun bir kontrol yapısının tasarlanması gereklidir. Literatürde 1-DoF sistemler üzerinde PID denetiminin performans analizi [18], laboratuvar ölçekli düzeneklerin tasarımı ve kontrol testleri [19], ayrıca 2-DoF sistemlerde kayma kipli ve optimizasyon tabanlı yöntemlerin uygulanması [20] gibi çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, helikopter test yataklarının geniş bir yöntem yelpazesine uygunluğunu ortaya koymaktadır. Ancak genellikle tek bir kontrol yaklaşımı ön plana çıkarılmıştır. Bu çalışmada ise temel yöntemler olan PID, PI ve PD denetçileri aynı deneysel platform üzerinde sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı yaklaşım, savunma projelerinde farklı görev senaryoları için en uygun kontrol stratejisinin seçilmesine yönelik değerli bir perspektif sunmaktadır. Bu çalışmada ele alınan problem; yalnızca dikey eksende

hareket edebilen bir helikopter deney kitinin, belirlenen referans konuma minimum hata ile ve kararlı bir şekilde yönlendirilmesidir. Sistemin yapısı itibariyle, rotorun ürettiği kuvvetle doğrudan ilişkili olan hareket, dışsal bozucu etkilerden ve sistem parametrelerinden etkilenebilir. Bu nedenle uygun bir geri besleme mekanizmasına dayalı kontrol algoritması gereklidir.

Bu projenin temel amacı, Tek Serbestlik Dereceli bir helikopter deney kiti üzerinde oransal-türev-integral (PID) kontrolör tasarımı gerçekleştirerek, sistemin belirli bir referans konuma minimum salınım ve maksimum kararlılıkla ulaşmasını sağlamaktır [3]. PID kontrolörler, sağlamlıkları ve uygulama kolaylıkları nedeniyle endüstriyel ve askeri pek çok uygulamada yaygın olarak kullanılmakta olup, bu çalışma bu algoritmanın temel performans karakteristiklerinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Kontrol sisteminin tasarım sürecinde, sistemin dinamik özellikleri analiz edilmiş, PID parametreleri uygun şekilde belirlenerek kontrolcü devreye alınmıştır. Proje kapsamında aşağıdaki hedefler gözetilmiştir:

- Helikopter deney kitinin fiziksel ve matematiksel modellemesini oluşturmak
- PID parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek
- Kontrol uygulamasıyla deney kitinin kararlılığını test etmek
- Gözlemlenen sistem tepkisi doğrultusunda kontrol performansını yorumlamak

Aynı zamanda, bu proje ile daha gelişmiş kontrol sistemlerine geçişte temel bir altyapı oluşturulması hedeflenmektedir. Bu altyapı, savunma sanayii için gerekli olan otonom uçuş, hassas konumlandırma gibi ileri seviye teknolojilerin geliştirilmesi için bir basamak teşkil etmektedir.

Metodoloji

Katı Model Tasarım

Projede kullanılan Acrome şirketinin 1-DoF helikopter deney kiti[4]; sistemin tüm bileşenlerini taşıyan taban plakası, taban plakasına bağlı sistemi istenmeyen hareketlere karşı minimize eden dikey plaka, hareket eksenini oluşturan silindirik ana çubuk, ana çubuğun stabilitesini sağlayıp tek yönde hareketine izin veren yataklar, kitin konum bilgisini takip eden sensörler ve gövde kısmından oluşmaktadır. Bu modüler ve sağlam mekanik tasarım, gerçek askeri sistemlerde olduğu gibi, güvenilir veri toplama ve tekrarlanabilir testler yapılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 1: Yan Açıdan Deney Kitinin CAD Tasarımı



Şekil 2: Üst Açıdan Deney Kitinin CAD Tasarımı



Şekil 3: Alt Açıdan Deney Kitinin CAD Tasarımı

Deney kitinin Catia programından alınmış 3D CAD görüntüleri **Şekil 1-2 ve 3** ‘de verilmiştir. Katı model, yalnızca görsel bir temsil sunmakla kalmamış, aynı zamanda motor ve karşı ağırlık kütleleri ile bunların pivot noktasına olan mesafelerinden yola çıkarak sistemin toplam atalet momentinin hesaplanmasında temel bir araç olarak kullanılmıştır. Doğru atalet momenti hesabı, kontrolcü tasarımı için hayati öneme sahiptir ve bu süreç, savunma sanayii projelerinde karmaşık platformların modellenmesi için bir örnek oluşturmaktadır.

Bulgular ve Tartışma

Sistem Modelleme ve Matematiksel Modelin Türetilmesi

Helikopter deney kitinin hareket denklemlerini çıkartmak ve PID kontrolcüsünü geri besleyecek kontrol mekanizmasını oluşturmak için aşağıda açıklanan matematiksel modeller kullanılmıştır [4]. Bu tür modelleme çalışmaları, savunma sanayinde kullanılan insansız hava araçları (İHA) ve döner kanatlı sistemlerde uçuş kontrol algoritmalarının geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Özellikle hassas görevlerde kullanılan bu sistemler için, doğru matematiksel modeller sayesinde konumlama doğruluğu ve kararlılık artırılmaktadır.

Tablo 1 : Denklemlerde Kullanılan Semboller

Semboller	Anlamları
l_1	Ağırlık ile pivot noktası arasındaki mesafe
l_2	Motor ve pivot noktası arasındaki mesafe
m_h	Motorun kütlesi
m_b	Ağırlığın kütlesi
J_e	Sistemin atalet momenti
g	Yer çekimi ivmesi
I_s	Motor için akım
θ	Açısal Konum
$\dot{\theta}$	Açısal hız
$\ddot{\theta}$	Açısal ivme
K	Kuvvet sahibi
F_h	Motorun uyguladığı kuvvet
k_f	Viskoz sürtünme katsayısı
s	Laplace değişkeni

$$J_e\ddot{\theta} = l_1F_h - l_1m_hg - k_f\dot{\theta} \quad (1)$$

Denklem 1' de bulunan $J_e\ddot{\theta}$ terimi kolun atalet momentini ve açısal ivmesini temsil ederken

$l_1 F_h$ terimi motorun uyguladığı torku, $l_1 m_h g$ terimi yerçekimi etkisini, $k_f \dot{\theta}$ ise sönümleme etkisini temsil eder. $m_h g$ yerine basitleştirilmiş bir gösterim olan G kullanılarak, denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$J_e \ddot{\theta} = K l_1 I_s - l_1 G - k_f \dot{\theta} \tag{2}$$

Helikopter deney kitinin motor ve ağırlık momentleri $m_h l_1^2$ ve $m_b l_2^2$ olduğundan deney kitinin atalet moment denklemi Denklem 3' deki gibi ifade edilir.

$$J_e = m_h l_1^2 + m_b l_2^2 \tag{3}$$

Denklem 1 ile Denklem-3' ün beraber kullanılmasıyla Denklem 4 elde edilir.

$$J_e \ddot{\theta} + k_f \dot{\theta} = K l_1 I_s \tag{4}$$

Sistemin dinamik davranışını analiz etmek ve kontrol sistemlerini tanımlamak için sistemin

$$J_e s^2 \theta(s) + k_f s\theta = K l_1 I_s(s) \tag{5}$$

giriş-çıkış ilişkisini ifade eden transfer fonksiyonu [5] Denklem-6 kullanılmıştır.

Transfer fonksiyonu frekans cinsinden temsil edildiği için de zaman denklemini frekans cinsine çeviren Laplace dönüşümü Denklem-5 kullanılmıştır [5].

$$\frac{\theta(s)}{I_s(s)} = \frac{K l_1}{J_e s^2 + k_f s} = \frac{30}{s^2 + 2.2s} \tag{6}$$

Modelleme süreci, sistemin fiziksel parametrelerine dayalı olarak açısal moment denkleminden başlanarak, sönümleme etkileri ve harici moment katkısı göz önüne alınarak adım adım türetilmiştir. Denklem (6)'da elde edilen transfer fonksiyonu, PID kontrolör tasarımında kullanılmak üzere sistemin giriş-çıkış ilişkisini tanımlamaktadır. Bu transfer fonksiyonu, Simulink ortamında modellenen sistemin temelini oluşturmuş ve savunma sanayinde görev yapan helikopterlerin hassas konumlama, hedef takip ve kararlı uçuş gibi görevlerine yönelik kontrol altyapısına başlangıç düzeyinde bir referans sunmuştur.

Deneysel Analizler

Bu bölümde, PID kontrolü kullanılarak tek serbestlik dereceli helikopter kitinin performansının incelenmesi amaçlanmaktadır. Deneysel analiz, sistemin dinamik tepkisini anlamak, farklı kontrolör yapılarını karşılaştırmak ve sistemin kontrol parametrelerini optimize etmek için gerçekleştirilmiştir.
Öncelikle sistemin matematiksel modelinden faydalanılarak transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Daha sonra bu model Simulink ortamında PID kontrol yapısı ile tasarlanmıştır. Simulink modeli, sistemin fiziksel davranışını simüle etmek için hazırlanmış ve farklı kontrol yöntemleri test edilerek uygun parametreler belirlenmiştir.

Aşağıda ise deney sırasında elde edilen grafikler, diyagramlar ve sistemin çalışma prensibini açıklayan şemalar sunulmaktadır. Bu veriler, kontrol sisteminin doğruluğunu ve etkinliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, PID kontrol yönteminin salınımları azaltmada ve hedef konuma hızlı, kararlı bir şekilde ulaşmada üstün bir performans sergilediğini göstermektedir.

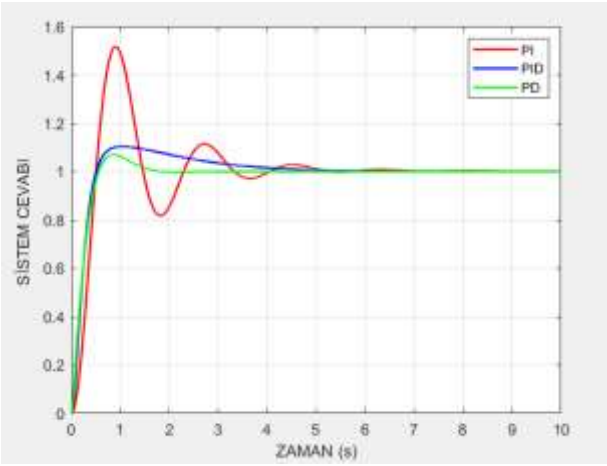
Denklemler, Tablolar ve Resimler

Sistem dinamikleri diferansiyel denklemlerden türetilmiş ve giriş-çıkış ilişkisini tanımlayan transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu fonksiyon, sistemin dinamik davranışını analiz etmek ve kontrol sistemleri tasarlamak için kritik bir araçtır.

PID kontrolörü, transfer fonksiyonuna dayalı olarak tasarlanmıştır:

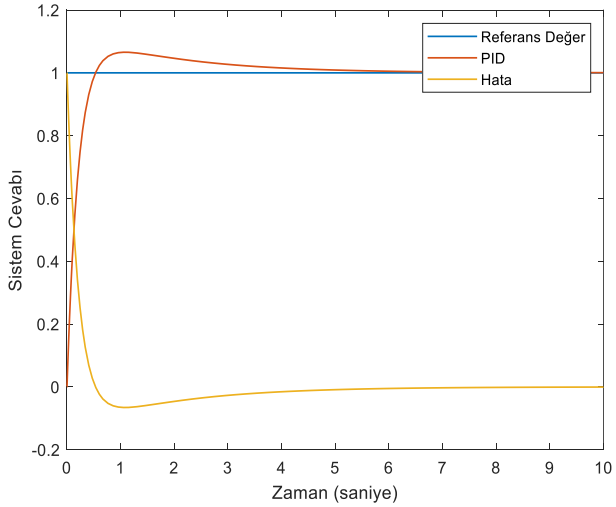
Transfer fonksiyonu:

$$\frac{\theta(s)}{I_s(s)} = \frac{Kl_1}{J_e s^2 + k_f s} = \frac{30}{s^2 + 2.2s} \qquad \textbf{(6)}$$



Şekil 4. Kontrolör Karşılaştırma Grafiği

PID, PI ve PD kontrolörlerinin sistem tepkileri karşılaştırılmıştır. PI kontrolör daha fazla aşım yaparken, PD hızlı tepki verse de kalıcı hata bırakmaktadır. PID kontrolör ise kalıcı hatayı sıfırlayarak daha dengeli ve kararlı bir performans sunmuştur. Bu durum, savunma sanayinde hedef takip ve hassas konumlama görevleri için PID'in tercih edilmesini desteklemektedir.



Şekil 4. PID Kontrolör Cevabı

Simulink'te elde edilen PID kontrolör yanıtı, sistemin adım girişine hızlı ve kararlı tepki verdiğini göstermektedir. Bu özellik, savunma sanayinde kullanılan hava araçlarının ani manevralara veya dış bozuculara rağmen dengeli uçuş yapabilmesi için kritik öneme sahiptir.

Tablo 2: PID Ayarlanmış Değerler

Kontrol Parametreleri	Blok
P	0.4531
I	0.1815
D	0.1713

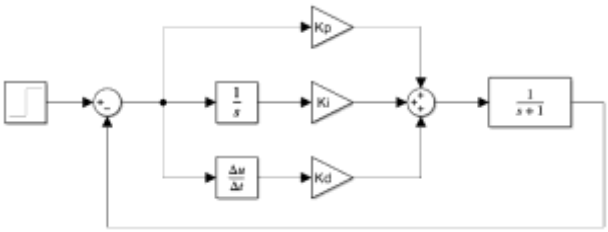
PID parametrelerinin Simulink PID Tuner ile otomatik olarak ayarlandığı değerler verilmiştir. Bu parametrelerin doğru belirlenmesi, savunma sanayinde görev yapan sistemlerde farklı operasyon koşullarına hızlı uyum sağlayan kontrol mekanizmalarının temelini oluşturmaktadır.

Tablo 3: PID Parametreleri Sonucu Sistem Performansı

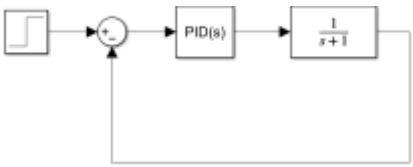
Kontrol Parametreleri	Blok
Yükseliş Zamanı	0.347 s
Oturma Zamanı	3.55 s

Aşım	6.58%
Pik	1.07
RMS Hatası	0.1639
Kalıcı Hata	0

Yükseliş zamanı, oturma zamanı ve RMS hata gibi kriterlerde PID'in başarılı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, özellikle yük taşıyan veya uzun süreli gözetleme görevi yapan hava araçlarının stabilitesini koruması için büyük önem taşımaktadır.

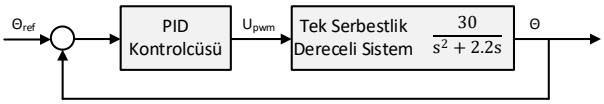


Şekil 6: Simulink Manuel PID Tasarımı



Şekil 7: Simulink Otomatik PID Tasarımı

Şekil 6 ve 7, PID kontrolörünün Simulink ortamında hem manuel olarak hem de otomatik olarak tasarlandığını göstermektedir [8], [9]. Manuel PID tasarımında, kontrolörün her bir bileşeni (P, I, D) ayrı ayrı modellenmiş ve sistemin tepkisi detaylı bir şekilde oluşturulmuştur. Otomatik PID tasarımında ise Simulink'teki hazır PID bloğu kullanılarak kontrol süreci daha pratik bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Modelin temel amacı, sistemin belirlenen referans açıya en kısa sürede ve en kararlı şekilde ulaşmasını sağlamaktır.



Şekil 8: Geri Besleme Diyagramı

Şekil 8, PID kontrolü ile kontrol edilen tek serbestlik dereceli helikopter kitinin çalışma prensibini açıklamaktadır [10]. Diyagramda, sistemin belirlenen referans açısına ulaşmasını sağlamak için izlediği adımlar gösterilmektedir [11]. Sistem, belirli bir referans açısı (θref) ile başlar. Gerçek açısal konum (θ) sensör tarafından ölçülerek geri besleme yoluyla referans

değerle karşılaştırılır. Aradaki fark, yani hata sinyali (e(t)) hesaplanarak PID kontrolörüne iletilir.

PID kontrolörü, bu hata sinyalini kullanarak orantısal (P), integral (I) ve türevsel (D) bileşenleri hesaplar ve uygun bir kontrol sinyali üretir. Bu kontrol sinyali, motorun akımına etki ederek üretilen torku belirler ve sistemin açısal hareketini düzenler. Helikopter transfer fonksiyonu, bu kontrol sinyaline bağlı olarak sistemin dinamik tepkisini oluşturur ve açısal konumu değiştirir. Bu süreç, geri besleme mekanizması sayesinde sürekli tekrar ederek sistemin referans açıya ulaşmasını ve kararlı bir şekilde o açıda kalmasını sağlar.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, tek serbestlik dereceli (1-DoF) helikopter deney kiti üzerinde PID, PI ve PD kontrolörleri tasarlanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, özellikle PID kontrol yapısının daha düşük aşım, sıfıra yakın kalıcı hata ve kısa oturma süresi gibi kriterlerde üstün performans sergilediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, deneysel ölçekte gerçekleştirilen çalışmaların, temel kontrol teorisinin anlaşılması ve farklı algoritmaların sistematik şekilde test edilmesi açısından değerli olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın en önemli katkılarından biri, yalnızca eğitim amaçlı bir platform kullanılmış olsa da elde edilen deneyimlerin daha karmaşık ve çok serbestlik dereceli sistemlere uygulanabilir bir temel sunmasıdır. PID, PI ve PD kontrolörlerinin karşılaştırmalı incelenmesi; insansız hava araçları, döner kanatlı platformlar veya savunma amaçlı otonom sistemlerde uygulanabilecek kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için başlangıç düzeyinde bir referans oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, bu sonuçların doğrudan gerçek hava araçlarına aktarılması mümkün değildir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda:

- 2-DoF ve 3-DoF sistemlere geçiş yapılarak daha karmaşık dinamiklerin modellenmesi,
- LQR, LQG, kayma kipli ve adaptif kontrol gibi ileri yöntemlerin deney kiti üzerinde test edilmesi,
- Donanım-içinde-simülasyon (HIL) uygulamalarıyla gerçek zamanlı kontrol senaryolarının incelenmesi,
- Savunma sanayiinde kullanılan görev profillerine daha yakın test senaryolarının geliştirilmesi

önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma hem öğrenciler hem de araştırmacılar için PID temelli kontrol yaklaşımlarının pratikte nasıl çalıştığını gösteren önemli bir örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, elde edilen deneysel veriler ve metodoloji, gelecekte daha gelişmiş kontrol algoritmalarının geliştirilmesine yönelik faydalı bir basamak niteliğindedir.

Teşekkürler ve Bilgilendirme

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmamız süresince değerli katkılarından dolayı Dr. Fethi CANDAN'a teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışmamızı sunma fırsatı tanıyan Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu düzenleme kuruluna ve Erciyes Üniversitesi'ne teşekkür ederiz. Bu proje sürecinde teknik destek sağlayan Acrome şirketi ve yetkililerine teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] S. E. Hamamci, "Design of a PID-type fuzzy logic controller for a 1-DOF helicopter," *2007 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2007.

[2] P. E. I. Pounds ve A. M. Dollar, "Stability of Helicopters in Compliant Contact Under PD-PID Control," *IEEE Trans. Robot.*, cilt: 30, sayı: 6, s: 1472-1486, 2014

[3] N. A. M. Zuki, M. F. Rahmat, and A. R. Syafeeza, "Real-time Control of 1-DOF Helicopter using PID and LQR Controller," 2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, 2012.

[4] Acrome, "*1-DOF Helicopter Courseware,*" Acrome Inc., Maslak, Istanbul, 2019.

[5] G. Franklin, J. D. "Powell, ve A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*," Prentice Hall, 1994.

[6] K. Ogata, "*Modern Control Engineering*," 5. bs., Prentice Hall, 2022.

[7] R. Mane, K. Mahapatro, ve A."Gundecha, *Single Degree of Freedom Helicopter Model: Laboratory Setup Design*," s: 6, 2019

[8] W. Subhi Al-Dayyeni ve H. Saleh Mahmood, "PID Kontrol Perspektifi: Teknikler ve Kullanımlar", *ejeee*, cilt 3, no. 1, s. 1–8, 2025

[9] R. Keane, "*Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*," 2025

[10] Z. A. Karam, Z. S. Bakr, ve E. A. Saeed, "One Degree of Freedom Copter Design and Control using Smart and Simple PID Controller," *Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, s: 365-370, 2022

[11] K. J. Åström and R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 2008.

[12] K. J. Aström ve R. M. Murray "*Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*," Princeton, New Jersey, 2012

[13] W. AL-JUMAILI, "Angle control of a single-degree-of-freedom mechanical helicopter model," Tezler | Tezara, s:64, Gaziantep, 2025.

[14] F. Bullo ve R. M. Murray. 1995. "Proportional Derivative (PD) Control on the Euclidean Group". California Institute of Technology, 1995

[15] B.-K. Lee, I.-H. Kim, ve J. Kim, "Stability Analysis and Proposal of the Simplified Form of a Fuzzy PID Controller with Fixed Parameters," *J. Korean Inst. Intell. Syst.*, cilt:14, 2004,

[16] P. Ťapák ve M. Huba, “One Degree of Freedom Copter,” içinde *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017*,,

[17] R. Moreno-Díaz, F. Pichler, ve A. Quesada-Arencibia, “Computer aided systems Theory”, EUROCAST 2015

[18] R. Mane, K. A. Mahapatro, and A. D. Gundecha, “Single degree of freedom helicopter model: Laboratory setup design,” in *Proc. Int. Conf. Advances in Computing, Communication and Control (ICAC³)*, Mumbai, India, Dec. 2019.

[19] M. Moness, “PID control of a lab scale single-rotor helicopter system,” *Advanced Science and Technology*, vol. 10, no. 4, Mar. 2015.

[20] A. J. Humaidi and A. F. Hasan, “Particle swarm optimization-based adaptive super-twisting sliding mode control design for 2-degree-of-freedom helicopter,” *Measurement and Control*, vol. 52, no. 9–10, pp. 1403–1419, Nov. 2019.

[21] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers,” *Transactions of the ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.

[22] I. Abbas and M. K. Mustafa, “A review of adaptive tuning of PID-controller: Optimization techniques and applications,” *Int. J. Nonlinear Anal. Appl.*, vol. 15, no. 2, pp. 29–37, 2024.

[23] M. C. Rais, M. A. Hannan, A. Hussain, P. J. Ker, M. Bin Mansor, and T. M. I. Mahlia, “Comparative study of optimization techniques based PID tuning for automatic voltage regulator system,” *Eng. Proc.*, vol. 14, no. 1, art. 21, 2022.

DIKEY KALKIŞ ESNASINDA HELIKOPTER ROTORUNUN HÜCUM AÇISININ AERODINAMIK PERFORMANSA ETKISININ İNCELENMESI

Merve TEMİZ

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Kayseri-Türkiye
1140110377@erciyes.edu.tr +905533494178

Şanlı KAYA

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Kayseri- Türkiye
1140110362@erciyes.edu.tr +905386233466

Yusuf Gökhan ÜNLÜ

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Kayseri- Türkiye
1140110353@erciyes.edu.tr +905367952755

Buğrahan ALABAŞ

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Kayseri- Türkiye
bugrahanalabas@erciyes.edu.tr +905065891075

Özet

Helikopterin en kritik bileşeni rotordur ve rotorun ürettiği taşıma kuvveti, helikopterin faydalı yük taşıma kapasitesi ile doğru orantılıdır. Bu çalışmada, rotorun aerodinamik performansını optimize ederek taşıma kuvvetini artırmak hedeflenmiştir. Yapılan literatür incelemesi sonucunda, hücum açısının taşıma kuvvetini etkileyen önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Bu parametrenin etkisinin hem sayısal hem de deneysel olarak çok yönlü şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece, rotorun taşıma kuvvetinin artırılmasıyla birlikte yakıt tüketiminin ve CO_2 emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir. Çalışmada, değişken parametre hücum açısı olarak belirlenmiştir. Hücum açısı, 4 ile 8 derece olarak belirlenmiştir.. Belirlenen parametre kapsamında oluşturulan farklı rotor tasarımları, CATIA yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Çalışmada öncelikle doğrulama analizleri yapılmıştır. Doğrulama sonrasında, farklı rotor tasarımları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak Ansys programı üzerinden analiz edilip itki kuvveti hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilecek bulgular, analizler ve deneysel doğrulamalar sayesinde helikopter rotor tasarımına önemli katkılar sunacaktır. Elde edilen veriler, ilgili mühendislik ve araştırma alanlarında akademik rehberlik edebilecek nitelikte olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Helikopter Rotoru, Kanat Profili, Hücum Açısı, Rüzgâr Türbini

1. GİRİŞ

Helikopter; dikey iniş- kalkış yapabilen, çeşitli manevra kabiliyetine sahip döner kanatlı bir hava aracıdır. Helikopterin uçabilmesi için taşıma kuvveti üretmesi gerekir. Bu da rotor sayesinde gerçekleşir. Helikopter rotoru hem havada asılı kalmada verimli olmalı hem de seyir uçuşunda faydalı yük taşıyabilmelidir **[1]**.



Şekil 1: T625 Gökbey Helikopteri

Helikopter rotoru üç temel fonksiyona sahiptir:

1. Helikopter ağırlığına zıt yönde dikey taşıma kuvveti üretmek.
2. İleriye uçuş için yatay itici kuvveti üretmek.
3. Kuvvetler ve momentler oluşturarak helikopterin pozisyon ve irtifa kontrolünü sağlamak.

Sabit kanatlı bir uçakta bu fonksiyonları yerine getiren bileşenler farklı olmasına rağmen helikopter bu üç fonksiyonu rotor üstlenir **[2]**. Bu da rotor sistemi tasarım ve analizinin helikopterin performansı açısından ne kadar önemli olduğunu gösterir **[3]**.

Palalar helikopter rotorunu oluşturan ve taşıma kuvveti üreten ana bileşenlerden biridir. Pala şekli, rotor tasarımında kritik bir öneme sahiptir. Helikopter rotorlarında pala yapısının tasarımı, aerodinamik performansı etkilemektedir. Böylece helikopter için belirlenen sınır şartlarında istenilen miktarda taşıma üretilebilir. Taşıma ve sürükleme katsayısı palanın uygun aerodinamik tasarımı için dikkat edilmesi gereken önemli değerlerdendir. Bir helikopterin iyi bir performans sergilemesi için taşıma/sürükleme oranının maksimum (C_L/C_D), momentum/taşıma oranının (C_M/C_L) minimum olması istenmektedir **[4]**.

Aerodinamik performans artırmak, kanat profili etrafında oluşan taşıma kuvvetinin arttırılması ve sürükleme kuvvetinin azaltılması ile sağlanır. Taşıma kuvvetini arttırmak kanat profili etrafındaki basınç dağılımını artırmakla sağlanabildiği gibi aynı zamanda profil etrafındaki sınır tabaka kalınlığının düşürülmesi veya türbülanslı sınır tabakanın firar kenarı civarına taşınması ile sağlanabilir. Aerodinamik performansı artırmak için; hücum açısı

arttırılabilir, kanat profiline kamburluk verilebilir veya yüksek kaldırma aygıtları kullanılabilir **[5]**.

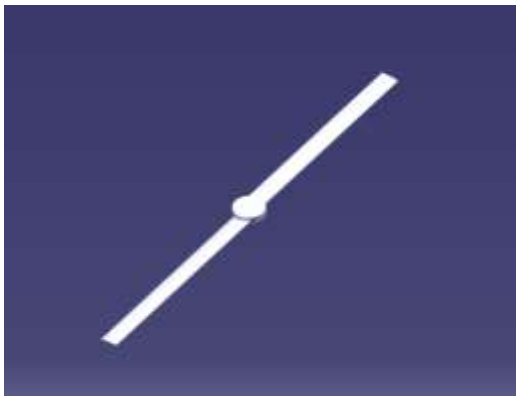
2. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Doğrulama

Kurulan sayısal modelin gerçeği ne ölçüde temsil ettiğini göstermek ve güvenilirlik sağlamak için doğrulama çalışması yapıldı. Elde edilen düşük bağıl hata ile bundan sonraki yapılan çalışmaların ve tasarım karşılaştırmalarının bilimsel geçerliliğini güçlendirmek hedeflenmiştir.

Main rotor diameter	14.69 m
Blade chord	0.593852 m
Number of blades	2
Down load	5% (assumed value)
Rotorcraft empty weight	2961.7 kg
Fuselage drag area	4.2 m2 (assumed value)

Tablo 1: Referans Geometri Değerleri



Şekil 2: Kullanılan Geometri

Doğrulama çalışması için Soufiane Stouti tarafından yazılan "Investigation of Helicopter Blade Tip Configuration during Hover Flight Employing Computational Fluid Dynamics" [7] makalesi kaynak alınmıştır. Öncelikle, makalede verilen rotor palasının özelliklerine uygun çizim CATIA uygulaması üzerinden modellenmiş olup ardından ANSYS Fluent arayüzü üzerinden doğrulama işlemleri yapılmıştır.

Table 3: Dimensions of the parallelepiped.

1	Limited distance $X+$	25 m
2	Limited distance $Y+$	25 m
3	Limited distance $Z+$	70 m
4	Limited distance $X-$	25 m
5	Limited distance $Y-$	25 m
6	Limited distance $Z-$	30 m

Şekil 3: Referans Boyut Değerler [7]

Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Non-Uniform
FD1, Cushion +X value (>0)	25 m
FD2, Cushion +Y value (>0)	30 m
FD3, Cushion +Z value (>0)	25 m
FD4, Cushion -X value (>0)	25 m
FD5, Cushion -Y value (>0)	70 m
FD6, Cushion -Z value (>0)	25 m

Şekil 4: Kullanılan Boyut Değerleri

TABLE 6: Reference values.

Reference values	Values
Area (m^2)	169.4
Enthalpy (J/kg)	113858.2
Density (kg/m^3)	1.225
Temperature (k)	300
Viscosity (kg/m. s)	1.7894e-05



Şekil 5: Referans Hacim değerleri [7]

Şekil 6. Kullanılan Hacim Değerleri

Mesh işlemi için kaynak referans modelinde 3.668.338 mesh nodülü kullandığı görülmüş, buna karşılık benzer mesh nodülü sayısı kullanılarak analizlere başlanmıştır.

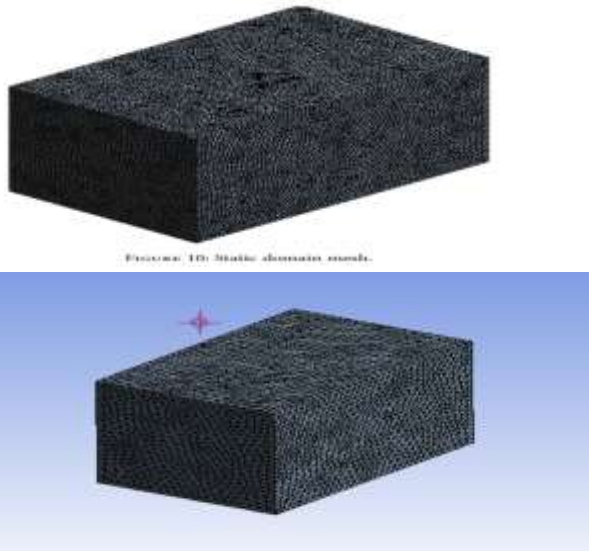
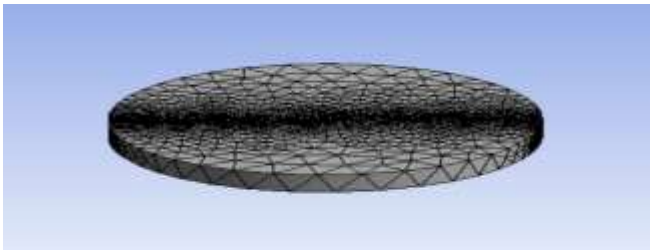


FIGURE 11: Rotating domain mesh.



Şekil 7: Referans Mesh Görüntüsü [7]

Şekil 8: Kullanılan Mesh Görüntüsü

Kullanılan diğer değerlerin doğrulama için eşleştirilmesinden sonra hesaplama işlemleri başlatılmıştır. Hesaplama işlemleri sonucunda doğrulama kaynağında 22034,4N bulunan itki değeri %1,5113 hata ile 21701,529N olarak hesaplanmıştır.

	Parabolic tip	Swept tip	Anhedral tip	Rectangular tip
Thrust (*N*)	21356.3	22058	21638.2	22034.4

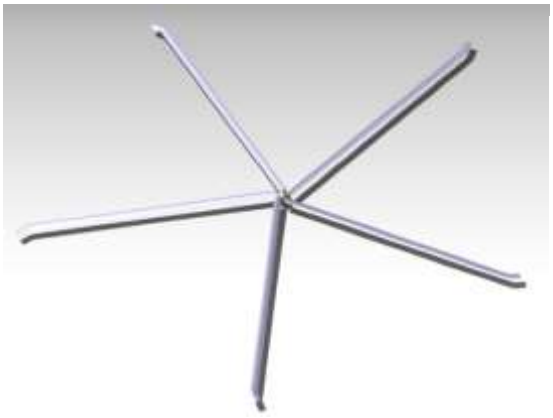
Şekil 9: Referans İtki Değeri

```
Pressure        Viscous         Total
propeller                   21732.512       -30.982868      21701.529
209.45486       -0.29860848     209.15625
------------------------ -------------- --------------- ---------------
--------------- --------------- ---------------
Net                         21732.512       -30.982868      21701.529
209.45486       -0.29860848     209.15625
```

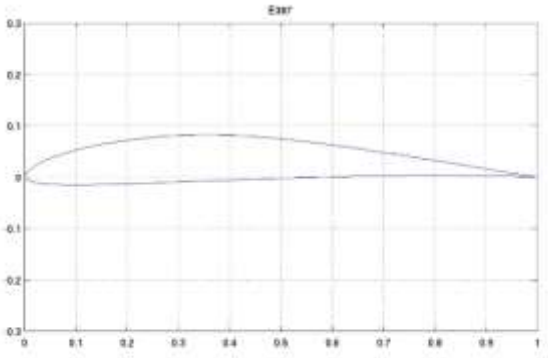
Şekil 10: Hesaplanan İtki Değerleri

Sayısal Model

Farklı pala yapıları oluşturmak için CATİA V5R21 3D modelleme programı kullanılmıştır. Yapılan tasarımların aerodinamik analizleri ANSYS V22R1 programı üzerinden incelenmiştir**.**



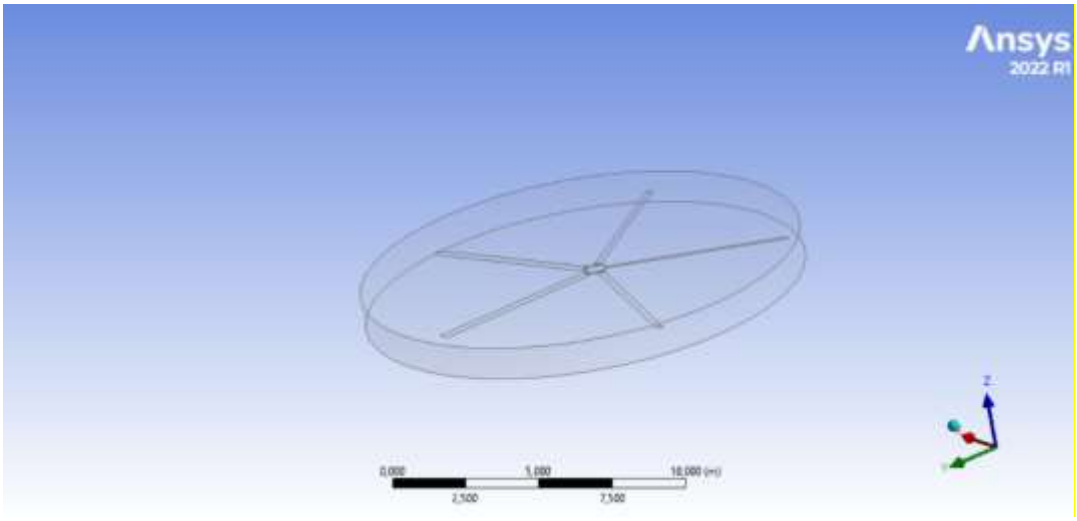
Şekil 11: Rotor Tasarımı



Şekil 12: Eppler E387 Kanat Profili

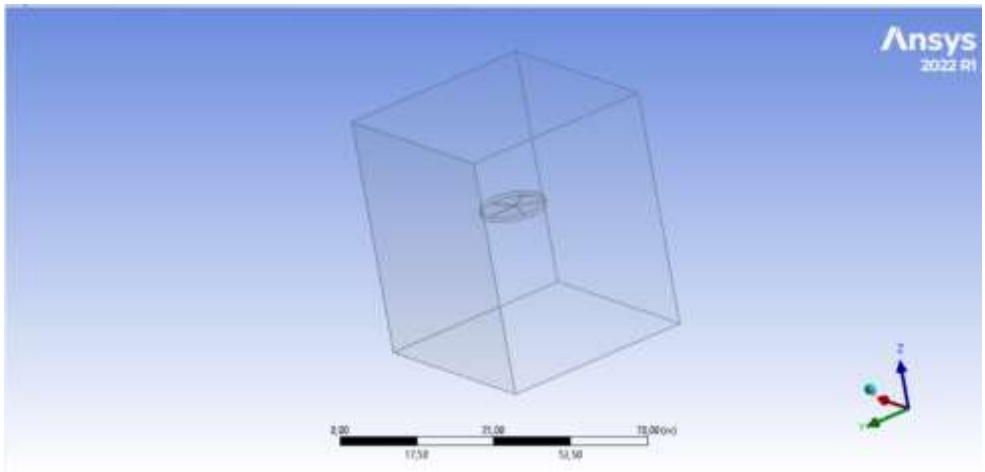
Mesh independence işlemi sonucun mesh seçiminden etkilenmediğini gösterir. Bu, yapılan analizin hem doğru hem de ikna edici olduğunu kanıtlamak için yapılır. Yapılacak olan analizlerde mesh elemanı sayısının sonuçlarına olan etkisini incelemek adına 600000 mesh elemanı değerinden başlayıp 1000000, 1500000, 2000000 ve 2500000 sayısında mesh elemanı kullanılarak akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonuçları incelenmiştir ve hata hesaplaması yapılmıştır. Sonuç olarak yaklaşık olarak 1000000 mesh eleman sayısının yeterli olacağına karar verilmiştir.

Eppler E387 kanat profiline sahip rotor CATİA uygulaması üzerinden tasarlanmış, Ansys programı ile mesh işlemi yapılmıştır. Tasarım; rotor çapı 13m, veter uzunluğu 1,78m olacak şekilde ve 4 derece hücum açısı ile tasarlanmıştır. Rotor etrafına 15 metre çapında, 2 metre yüksekliğinde silindirik Enclosure atanmıştır.



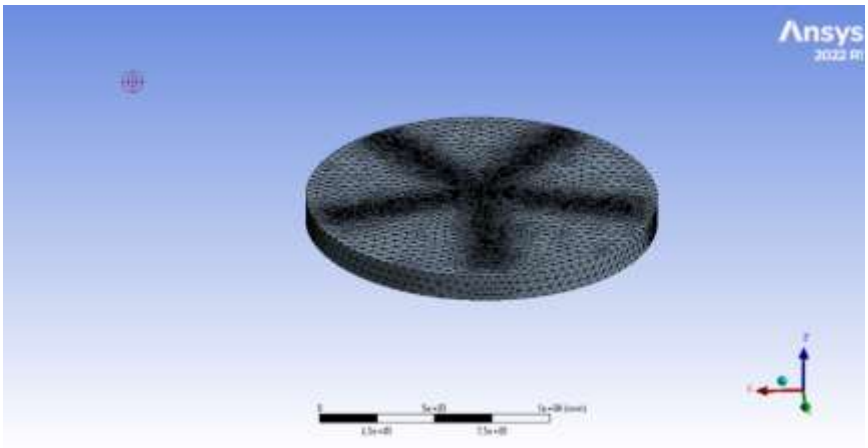
Şekil 13: Silindirik Hacim

Modellemede kanat profili bir serbest akış hacmi içerisine yerleştirilerek akışın viskoz etkilerden etkilenmemesi için dörtgen mesh sistemi kullanılarak kanat profilinin sınırlarına doğru kontrol hacimleri arttırılmıştır. Dikdörtgen hacmin boyutları; +x , -x, +z, -z yönünde 42 metre, +y yönünde 56 metre ve -y yönünde 77 metre olarak belirlenmiştir.

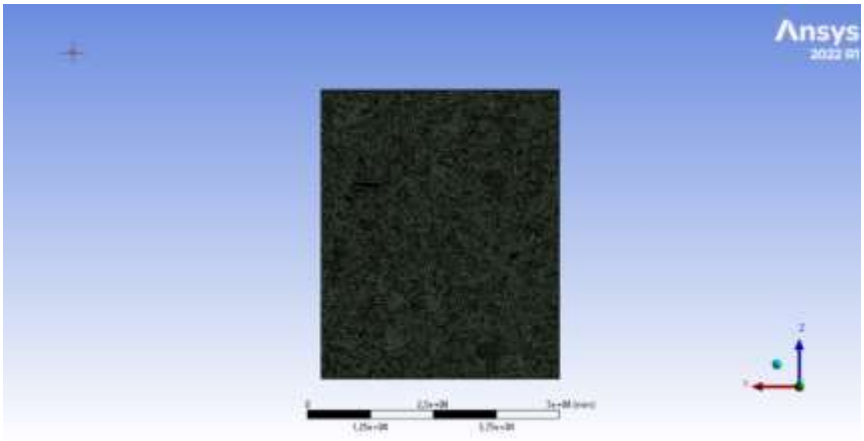


Şekil 14: Akış Hacmi

Rotor palaları etrafında daha hassas sonuç elde edilmesi için silindirik hacme kıyasla daha küçük mesh hücreleri kullanılmıştır. Dikdörtgen akış hacminde 450 mm, rotor üzerine 10 mm boyutlarında mesh hücreleri kullanılmıştır. Mesh oluşturulurken rotor üzerinde Capture Curvature ve Capture Proximity Local min size parametreleri 4.5 mm alınmıştır.

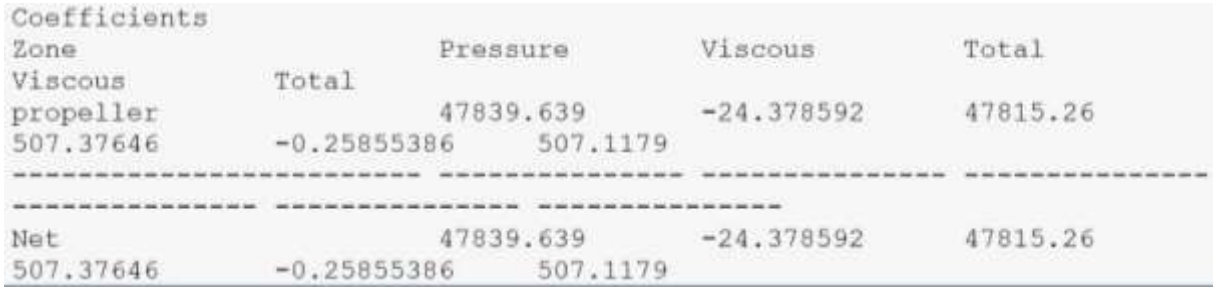


Şekil 15: Rotor Mesh Hücreleri Görüntüsü



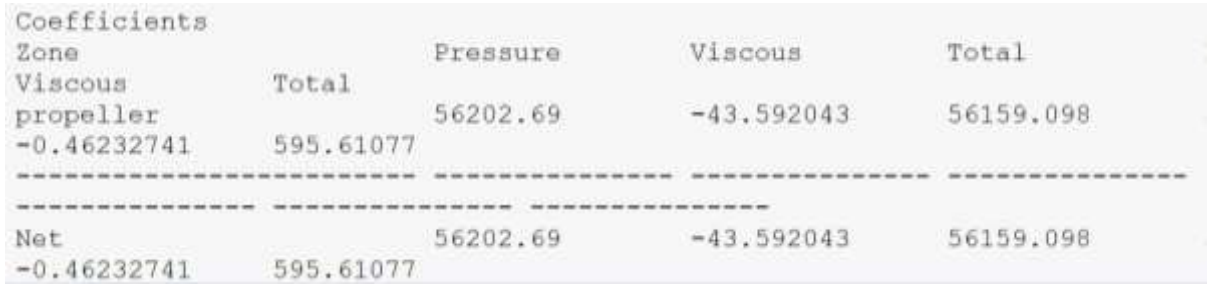
Şekil 16: Akış Hacmi Mesh Hücreleri Görüntüsü

Akış analizinde; akış modeli olarak SST k-omega bu türbülans modeli ve Scalable Wall Function yaklaşımı tercih edilmiştir. Rotor dönüş hızı 308 RPM olarak belirlenmiştir. Analizler, 1440 zaman adımı (time step), 0.00054 s zaman adımı büyüklüğü ve her adım için maksimum 500 iterasyon parametreleriyle gerçekleştirilmiştir.



```
Coefficients
Zone                          Pressure        Viscous         Total
Viscous         Total
propeller                     47839.639       -24.378592      47815.26
507.37646       -0.25855386     507.1179
------------------------- --------------- --------------- ---------------
--------------- --------------- ---------------
Net                           47839.639       -24.378592      47815.26
507.37646       -0.25855386     507.1179
```

Şekil 17: 4 derece Hücum Açısı Sonucu



```
Coefficients
Zone                          Pressure        Viscous         Total
Viscous         Total
propeller                     56202.69        -43.592043      56159.098
-0.46232741     595.61077
------------------------- --------------- --------------- ---------------
--------------- --------------- ---------------
Net                           56202.69        -43.592043      56159.098
-0.46232741     595.61077
```

Şekil 18: 8 derece Hücum Açısı Sonucu

Bu koşullar altında yapılan çözüm sonucunda, elde edilen itki değeri 47,815 kN olarak bulunmuştur. Aynı yöntem izlenerek 8° hücum açısına sahip pala yapısı için de analiz gerçekleştirilmiş olup, bu durumda elde edilen itki değeri yaklaşık 56,159 kN olarak hesaplanmıştır.

3. SONUÇ

Bu çalışmada, helikopter rotorlarının aerodinamik performansı üzerine hücum açısının etkileri incelenmiştir. Sayısal analizler sonucunda, 4° hücum açısında rotor yaklaşık 47,815 kN itki üretmiştir. Aynı yöntem 8° hücum açısına uygulandığında itki değerinin arttığı ve taşıma kapasitesinin yükseldiği görülmüştür. Bu durum, hücum açısının artmasının rotor tarafından üretilen taşıma kuvveti üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

İlerleyen aşamalarda, sayısal analizlerden elde edilen verilerin rüzgâr tüneli deneyleri ile doğrulanması planlanmaktadır. Böylece elde edilen bulguların gerçek uçuş koşullarıyla uyumu değerlendirilecek ve helikopter rotor tasarımına yönelik daha güvenilir sonuçlar elde edilecektir.

Ön Bilgi

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Proje yürütücüsü Merve Temiz, araştırmacılar Şanlı Kaya ve Yusuf Gökhan Ünlü, proje danışmanı ise Buğrahan Alabaş'tır.

4. KAYNAKÇA

[1] Brocklehurst, A., & Barakos, G. N. (2013). A review of helicopter rotor blade tip shapes. Progress in aerospace sciences, 56, 35-74.

[2] J. Gordon Leishman., “Principles of Helicopter Aerodynamics”, Cambridge University Press, United Kingdom, 2001.

[3] Mete, C. (2007). Helikopter rotor performansının sayısal analizi.

[4] Öztürk, T., Çınkır, Ö. Ç., Ürgün, S., Fidan, S. (2021). 2D Investigation of a Wing Consept with a NACA 4412 Airfoil in Ground Effect Operation. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(3), 548-561.

[5] Kaya, M. (2014). AIRFOIL YAPININ YAKIN ÇEVRESİNDEKİ HIZ VE BASINÇ DAĞILIMININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ. Erzincan University Journal of Science and Technology, 4(1), 59-69.

[6] Uzun, M., & Çoban, S. (2021). Aerodynamic Performance Improvement with Morphing Winglet Design. *Journal of Aviation*, *5*(1), 16-21.

[7] S. Stouti, A. T. Lahlou, I. Lagrat, H. Mounir, and O. Bouazaoui, “Investigation of helicopter blade tip configuration during hover flight employing computational fluid dynamics,” *Modelling and Simulation in Engineering*,

FARKLI TWIST AÇILARININ JET MOTORLARIN KOMPRESÖRLERINDE KULLANILAN NACA65 210 AIRFOIL GEOMETRISINDEKI STALL DURUMLARINA ETKISI

Tülay Sude Çetinkaya, Beyza Nur Aslan, Eylül Erdoğan, Buğrahan Alabaş
Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

Özet

Turbofan motorlarının kompresörlerinde meydana gelen akış boğulması durumu, hava aracının uçuş kalitesini etkileyen önemli bir husustur. Bu durumu minimum seviyeye indirmek için yapılan çalışmalar geçmişten günümüze kadar hala devam etmekte olup literatürde de güncel bir yer edinmiştir. Stall durumu, jet motorları için kritik bir konudur ve tasarımla bu durumun etkileri minimize edilebilir. Bu çalışmada yapılacak olan da NACA65 210 airfoil yapısının, hangi burulma açısında ve hangi hücum açısında stall durumunun minimum olduğu durumu tespit etmek olacaktır. NACA65-210 airfoil yapısına Ansys arayüzünde bulunan TurboGrid modülü kullanılarak geometriye mesh atılacak ve CFX modülüne aktarılacaktır. Bu geometride farklı burulma açısı kullanılacaktır. Tüm bu veriler doğrultusunda NACA65-210 airfoil yapısında stall durumunun optimum olduğu hücum açısı ve twist açısı değerleri tespit edilmiş olacaktır Çalışma sonuçlarının twist açılarına bağlı olarak stall durumuna etkilerinin ticari ve askeri uçaklarda kullanılması ile daha verimli uçuşlar hedeflenmektedir ve optimum tasarımın prototipi çıkarılarak fiziksel deneylerden de geçirilecektir. Aynı zamanda yaygın etki olarak proje sonucunda elde edilen veriler neticesinde uluslararası bilimsel toplantı ve TR indeks bir dergide yayınlanması için çalışmalar gerçekleştirilecektir. Bu proje, proje geliştiricilerinin jet motor kompresörlerindeki bıçakların burulma açısına göre stall durumlarının incelenmesinde ve ilerideki eğitim hayatlarında bunun üzerine koyarak yeni projeler veya tezler yazmasında etkin rol almaktadır.

Anahtar Kelimeler: turbofan, jet motor, kompresör, stall, twist açısı

1. GİRİŞ

Jet motorlarının kompresör bölümünde, bıçaklarda meydana gelen akış ayrılması diye de isimlendirilebilen stall durumu, motorun çalışmasını negatif yönde etkileyen önemli bir unsurdur. Kompresörlerin performansı ve istikrarlı çalışma aralığı, çeşitli turbomakine sistemlerinin verimli çalışması için kritik öneme sahiptir. Jet motorunun havanın sıkıştırıldığı yer olan kompresörde hava akışının düzensiz duruma geçmesi, hava akışını stabilize edememesi sonucunda ortaya çıkar. Bu, motorun verimliliğini düşürür ve potansiyel olarak motor arızasına neden olabilir. Uzun süreli stall durumları, bıçaklarda ve diğer bileşenlerde hasara yol açabilir. Stall durumu jet motorları için kritik bir konudur ve doğru önlemlerle bu durumun etkileri minimize edilebilir.

Kompresör bıçaklarındaki akış ayrılmasının motor için ciddi bir tehlike arz etmesi sonucunda, araştırmacılar da stall marjını iyileştirmek üzerine çalışmalara odaklanmıştır. Kompresör akış ayrımları konusundaki ilk araştırmalar, tamamen gelişmiş bir stall hücresinin akış yapısına

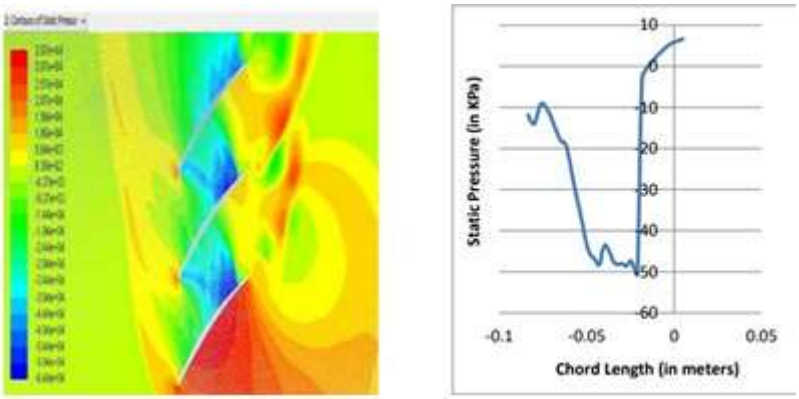
odaklanmıştır. Kwang-Jin Choi, Jin-Hyuk Kim ve Kwang-Yong Kim, 2010 yılında yayınladıkları makalelerinde beş adet çevresel muhafaza oluğuna sahip bir eksenel kompresörün stall marjını iyileştirmek için tasarım optimizasyonu yapmışlardır. Vardıkları sonuçlar ile kompresörün iç yüzeyine eklenen özel şekilli oluklar sayesinde, motorun arızalanmadan önce daha düşük hızlarda çalışabilmesini sağlamışlardır. [1] Lars Ellbrant, Lars-Erik Eriksson ve Hans Mårtensson, 2013 yılında yayınladıkları makalelerinde yüksek stall marjı ile yüksek verimlilik arasında denge sağlayan etkili bir tasarım yöntemi yaratmaya odaklanmışlardır. Sonuçlar, yüksek stall marjınaa ve yüksek verime sahip olma potansiyeline sahip tasarımları hem 2B hem de 3B optimizasyonda derecelendirmenin mümkün olduğunu göstermektedir. [2] Literatür incelendiğinde turbofan jet motorlarında stall durumu araştırılmasının güncel bir yer edindiği ve araştırmacıların halen ilgisini çektiği görülmektedir ve çalışmalarda yüksek hızda giren havanın airfoil sınır tabakası üzerinde oluşan akış düzensizlikleri sebebi ile ortaya çıkan akış boğulmaları araştırılmıştır. Özellikle askeri uçakların ekstra manevra kabiliyetine sahip olmaları kritik bir nokta olduğundan oluşabilecek stall davranışının araştırılması ve minimize edilmesi önem arz etmektedir.

2. SAYISAL MODEL

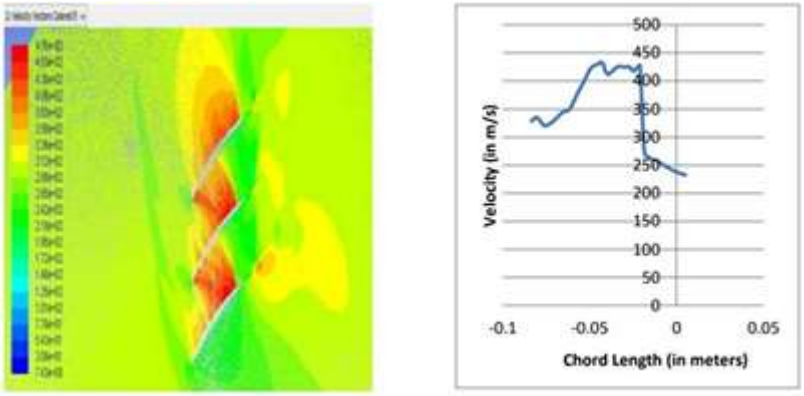
Vinayaka N. ve Akshaya C., eksenel kompresör bıçakları ile yüksek hızlı akış davranışını "Study of High Speed Flow Behavior Through Axial Compressor Cascade Blades" isimli makalelerinde incelemişlerdir. Mevcut çalışma, farklı hücum açıları altında kompresör kademesi boyunca yüksek hızlı akışın (süpersonik) davranışını anlamaya odaklanmaktadır.[3]

Bu çalışmaya; NACA65-210 airfoil tipinin SolidWorks ve Ansys arayüzlerinin kullanımıyla öncelikli olarak Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmalarında kullandıkları giriş parametrelerindeki, statik basınç ve hız değerleri teyit etmekle başlanmıştır. Ardından Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmasını iyileştirmek için bıçaklara farklı twist açıları vererek sonuçlar gözlemlenmiştir Ardından Ansys Fluent programında TurboGrid, CFX-Pre modüllerinden yararlanılarak akış analizi için sayısal sonuçlar elde edilmiş ve sonuçlar simüle edilmiştir.

Vinayaka N. ve Akshaya C.'nin NACA65-210 profilini kullanarak ve 0 derece hücum açısında buldukları analiz çıktıları aşağıda verilmiştir.



Şekil 1: NACA65-210 Airfoil Yapısının Statik Basınç Değişiminin Analiz Çıktısı [3]



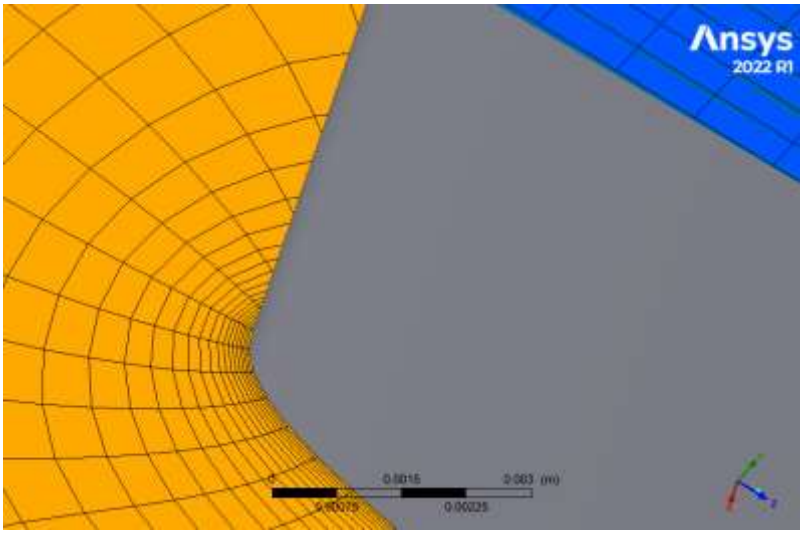
Şekil 2: NACA65-210 Airfoil Yapısının Hız Değişiminin Analiz Çıktısı [3]

Bu çalışmaya; NACA65-210 airfoil tipinin SolidWorks ve Ansys arayüzlerinin kullanımıyla öncelikli olarak Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmalarında kullandıkları giriş parametrelerindeki, statik basınç ve hız değerleri teyit etmekle başlanacaktır. Ardından Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmasını iyileştirmek için bıçaklara farklı twist açıları vererek sonuçlar gözlemlenecektir.

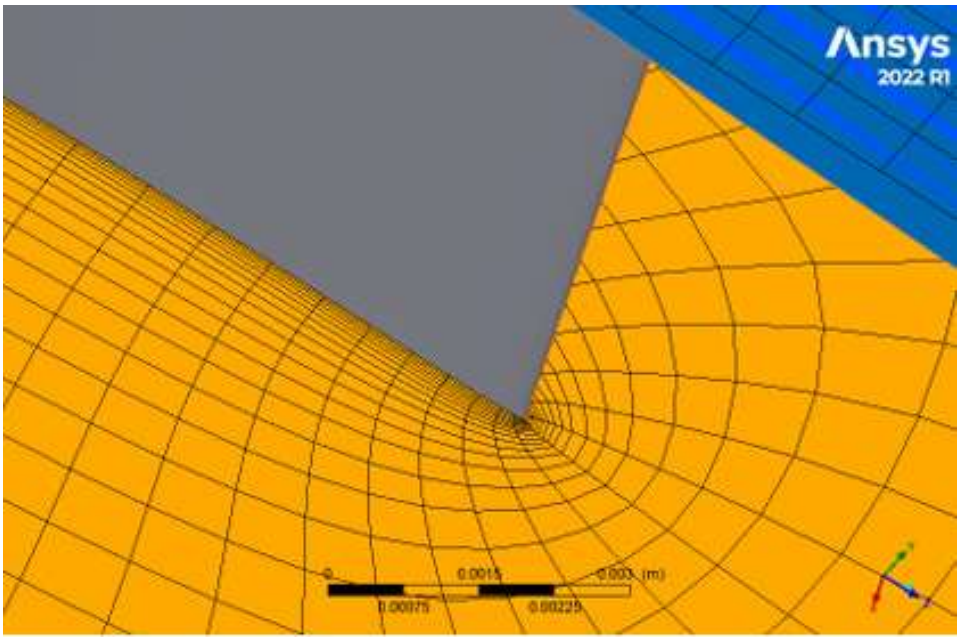
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

SST (Menter's Shear Stress Transport) Türbülans Modeli [4]



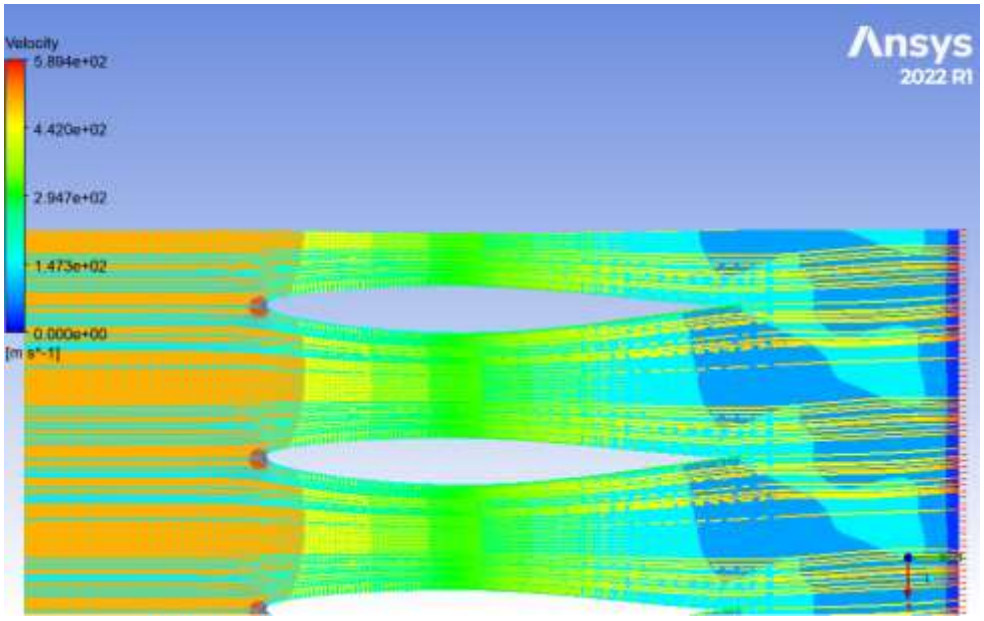
Şekil 3: Bıçak Profilinin Ansys TurboGrid Arayüzü Kullanılarak Oluşturulan Hücum Kenarı Mesh Yapısı



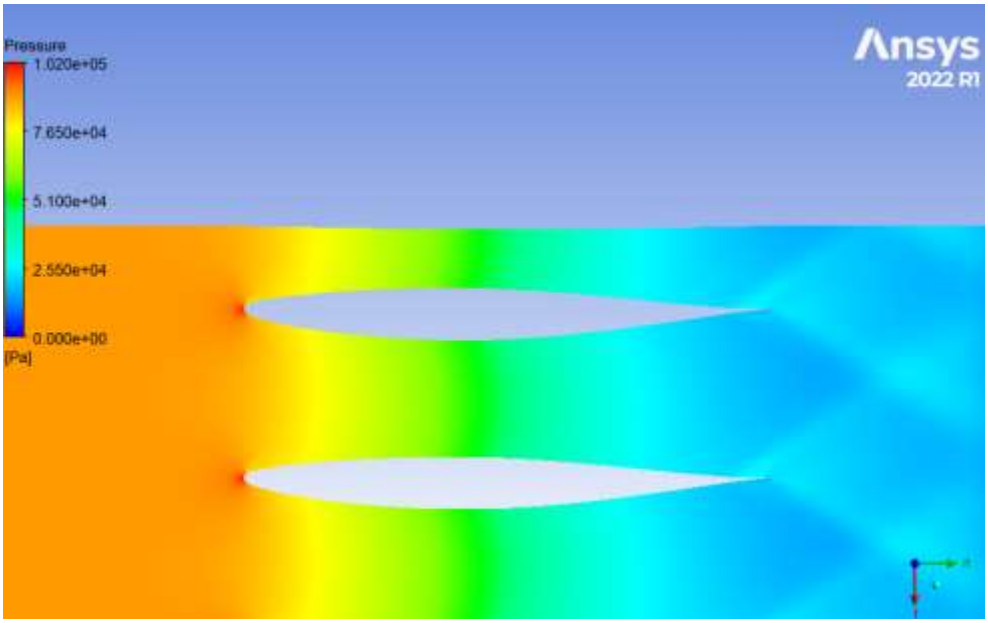
Şekil 4: Bıçak Profilinin Ansys TurboGrid Arayüzü Kullanılarak Oluşturulan Firar Kenarı Mesh Yapısı

3. SONUÇLAR

Bu çalışmaya; NACA65-210 airfoil tipinin SolidWorks ve Ansys arayüzlerinin kullanımıyla öncelikli olarak Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmalarında kullandıkları giriş parametrelerindeki, statik basınç ve hız değerleri teyit etmekle başlanmıştır. Teyit amaçlı yapılan analizler doğrultusunda da önceki analizler doğrulanmıştır.

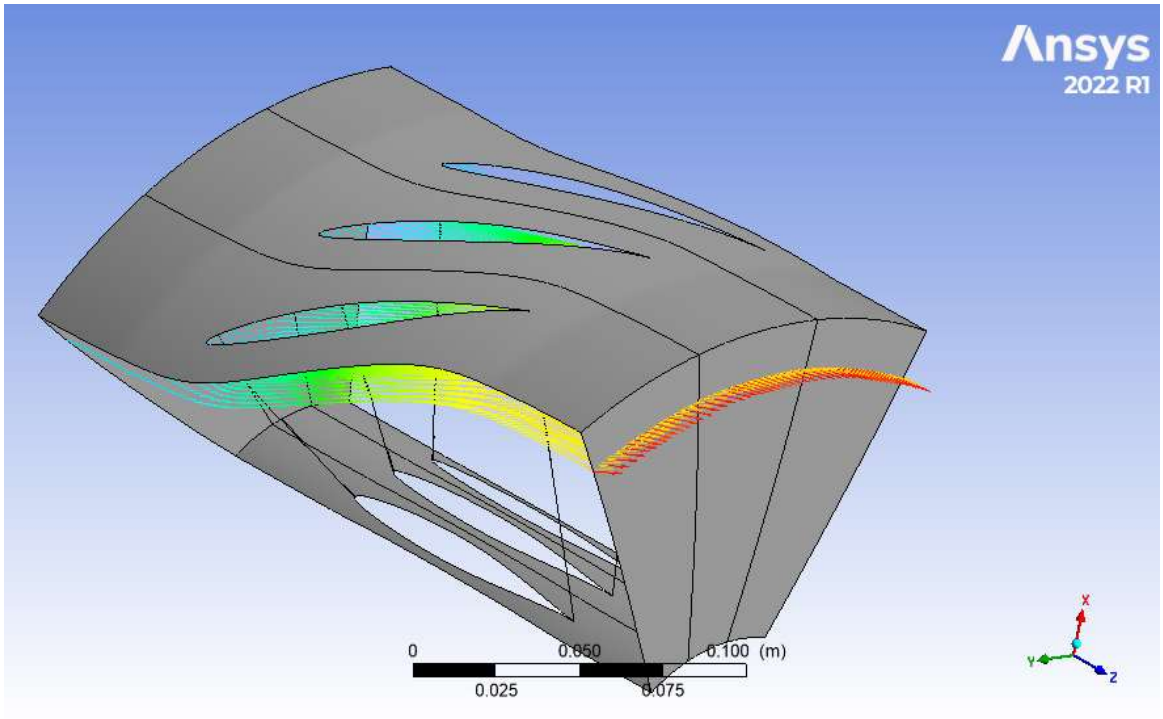


Şekil 5: 0 Hücum ve 0 Burulma Açısı ile Çizilmiş Bıçak Yapısının Hız Değerleri

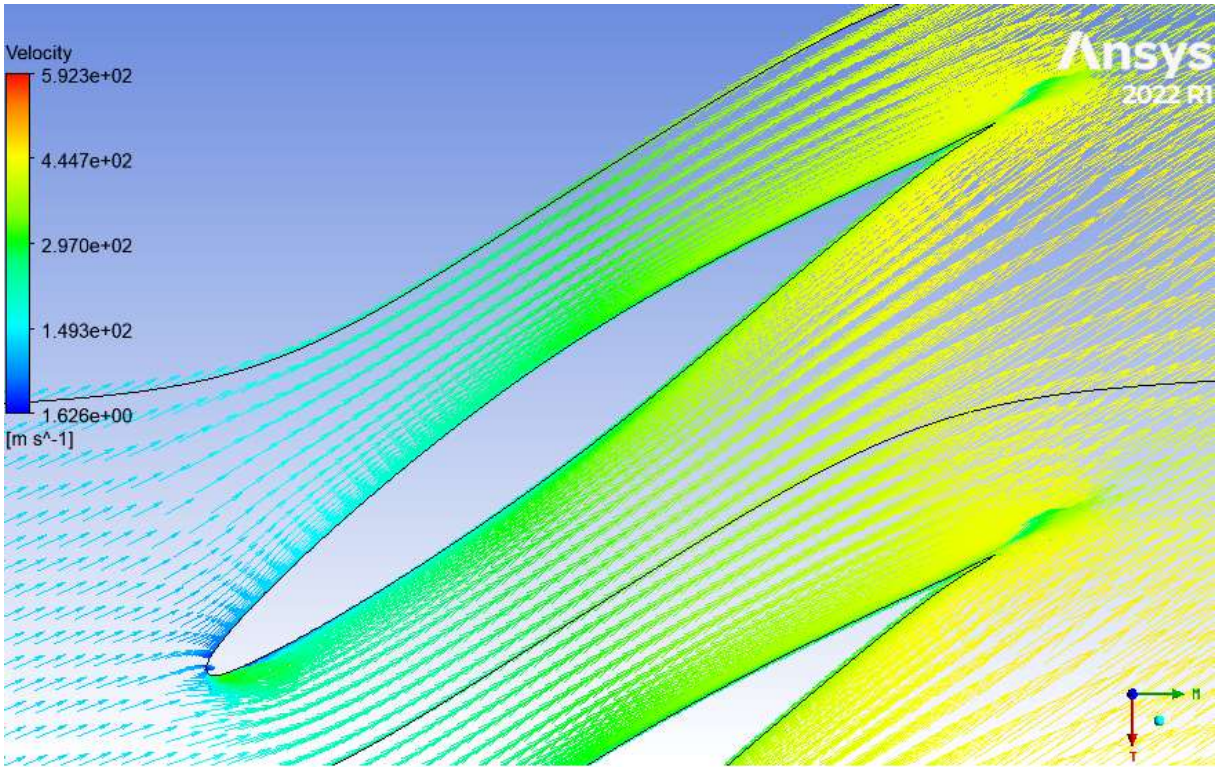


Şekil 6: 0 Hücum ve 0 Burulma Açısı ile Çizilmiş Bıçak Yapısının Statik Basınç Değerleri

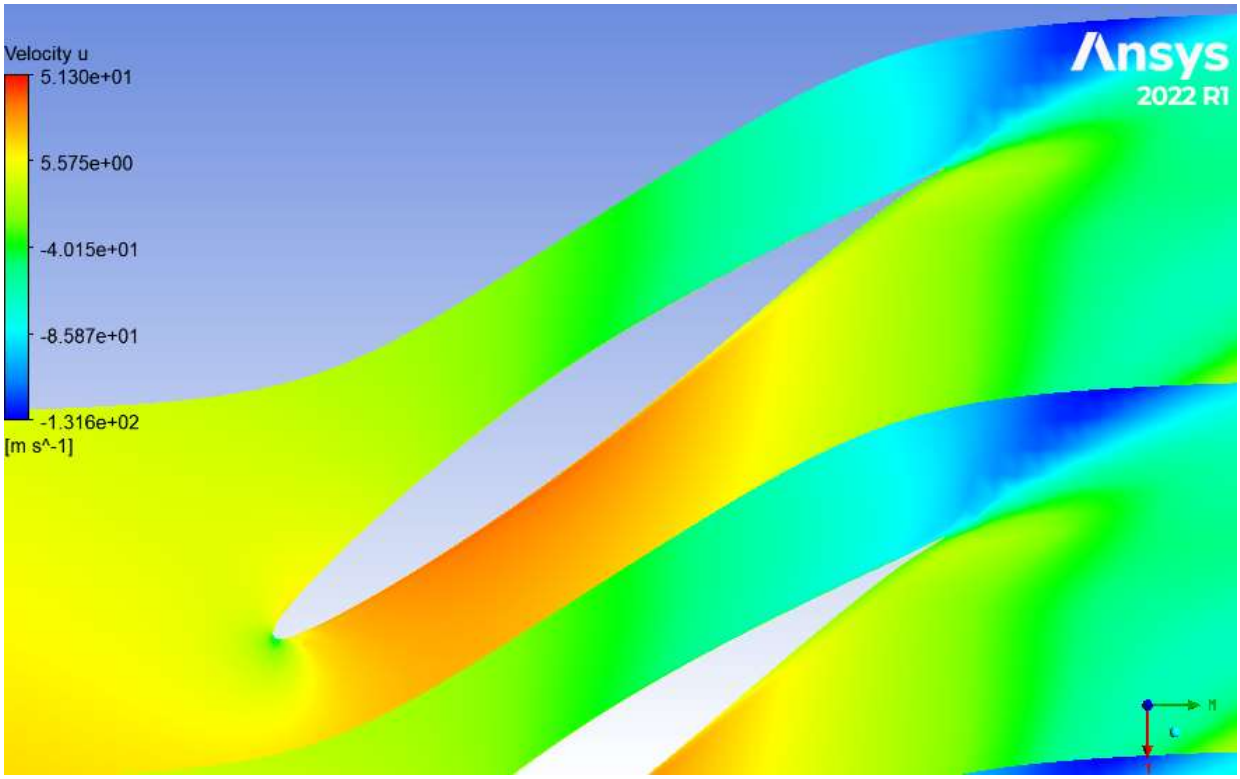
Hiçbir burulma açısının olmadığı durumda dahi hava akışının boğulduğu nokta bıçak profilinin hücum firarı olarak gözlemlenmektedir. Vinayaka N. Ve Akshaya C.'nin çalışmalarında kullandıkları giriş parametrelerindeki hava giriş hızı 295,75 m/s giriş çalışma basıncı 101.3 kPa, çıkış basıncı ise 0 bar olarak alınmıştır.



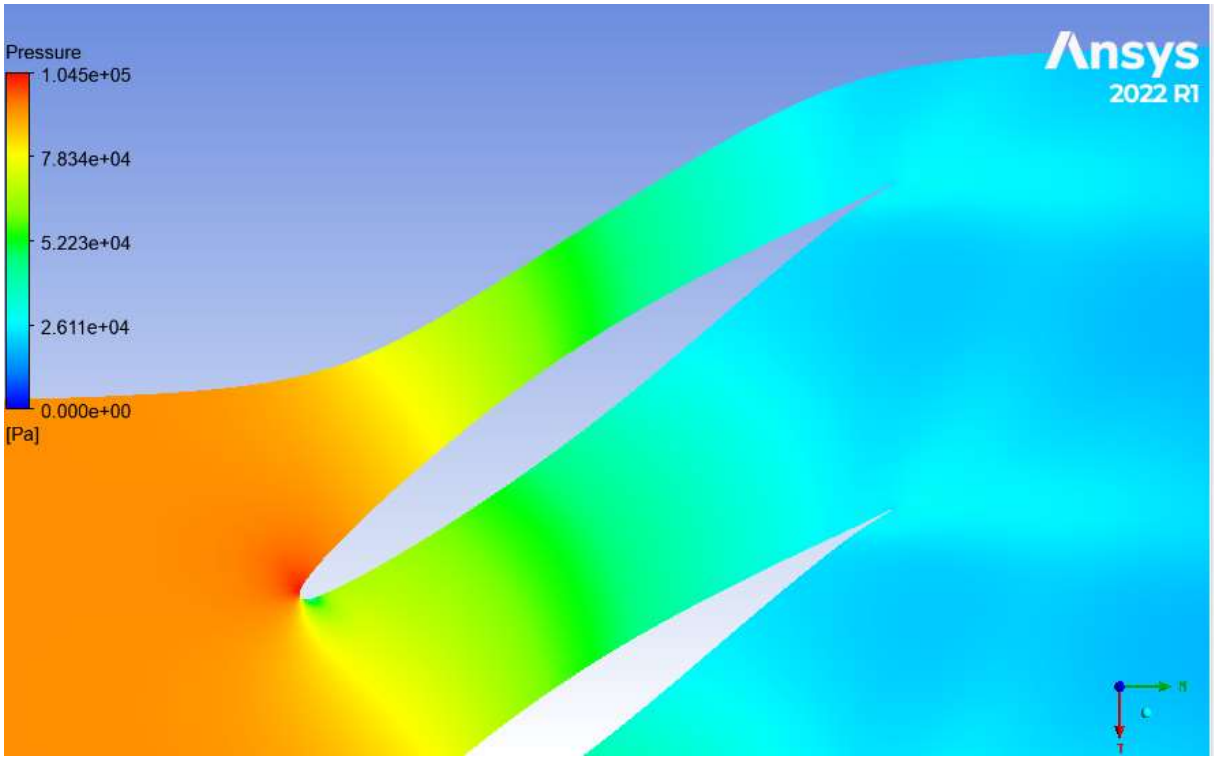
Şekil 7:Bıçak Profilinin 40 Burulma Açısı ile Optimize Edilmiş Akış Alanı Görüntüsü



Şekil 8:Bıçak Profilinin 40 Burulma Açısı ile Optimize Edilmiş Akış Çizgileri



Şekil 9:Bıçak Profilinin 40 Burulma Açısı ile Optimize Edilmiş Hava Akış Hızı Değerleri



Şekil 10:Bıçak Profilinin 40 Burulma Açısı ile Optimize Edilmiş Hava Akışının Basınç Değerleri

Gösterilen hız dağılımı incelendiğinde, akışkanın bıçak girişinde hızlanmaya başladığı ve özellikle profilin emme yüzeyinde yüksek hız bölgelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Akışkanın hızındaki bu artış, Bernoulli prensibi gereği basınç düşümü ile doğrudan ilişkilidir. Basınç dağılımı sonuçları incelendiğinde, bıçak giriş kenarında yüksek basınç değerleri, emme yüzeyinde ise düşük basınç bölgeleri net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, akışkanın bıçaklar arasındaki hızlanmasını ve yönlendirilmesini doğrulamaktadır. Basınç dağılımı sonuçlarına göre, akışkanın profil yüzeyinde oluşan basınç farkı, kanatların itki üretme kabiliyetinin temel göstergesidir. Düşük basınç alanlarının genişlemesi akışın hızlanmasına, yüksek basınç bölgelerinin ise akışın yavaşlamasına neden olmuştur. Bu etki, bıçak geometrisinin akışkan üzerinde yarattığı yönlendirme etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, hız dağılımında görülen akışın bıçak aralarında homojen olarak yönlendirilmesi, kanat tasarımının akış kontrolünde etkin olduğunu göstermektedir.

Aynı zamanda yapılan analizler sonucunda, 0° hücum açısında farklı burulma açıları için elde edilen akış karakteristikleri karşılaştırılmıştır. 0° burulma açısında hız ve basınç dağılımlarının daha dengeli olduğu, akışın profil yüzeyine daha iyi yapıştığı ve belirgin bir akış ayrılması gözlenmediği tespit edilmiştir. Buna karşılık, 40° burulma açısında profil emme yüzeyinde yüksek hız bölgeleri ve buna bağlı güçlü düşük basınç alanları oluşmuş, hemen ardından akışta geri basınç etkisiyle ayrılma eğilimi belirginleşmiştir. Bu durum, yüksek burulma açılarının lokal yüklemeyi artırmasına rağmen stall eğilimini hızlandırdığını ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla, burulma açısı arttıkça kanat profili üzerinde daha yüksek yerel yükler elde edilse de akış kararlılığı azalmakta, sürükleme artmakta ve stall olasılığı güçlenmektedir. Bu bulgu, tasarım süreçlerinde burulma açısının dikkatle optimize edilmesi gerektiğini, aksi halde sistem performansının düşerek kararlılık sorunlarının ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Özetle burulma açısının artması, akışta stall eğilimini artırmasına rağmen, yerel kaldırmayı yükseltmesi, akış yönlendirme kabiliyeti sağlaması ve belirli uygulamalarda daha verimli yük dağılımı oluşturması açısından avantajlıdır.

REFERANSLAR

[1]Choi, K.-J., Kim, J.-H., & Kim, K.-Y. (2010). Design optimization of circumferential casing grooves for a transonic axial compressor to enhance stall margin. Volume 7: Turbomachinery.

[2] Ellbrant, L., Eriksson, L.-E., & Mårtensson, H. (2012). Design of compressor blades considering efficiency and stability using CFD-based optimization. Volume 8: Turbomachinery.

[3] Akshaya, C., & Vinayaka, N. (2018). Study of high speed flow behavior through axial compressor cascade blades. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(5), 371–382.

[4] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32(8), 1598–1605.

MONITORING POISSON'S RATIO OF GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES AS DAMAGE INDEX

Cagatay Yılmaz

Assist. Prof. Dr. Abdullah Gul University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri -Türkiye

yilmaz.cagatay@agu.edu.tr (Corresponding Author) ORCID: 0000-0002-8063-151X, +905445120930

Mehmet Yildiz

Prof. Dr. Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İstanbul - Türkiye

mehmet.yildiz@sabanciuniv.edu, ORCID: 0000-0003-1626-5858

Abstract

The uniaxial loading of fiber-reinforced polymer (FRP) composites, Poisson's ratio (υ_{xy}), a constant elastic property for isotropic materials, decreases significantly. Micro-damage created within FRP composites because of applied stress causes this decrease. As the level of micro-damage increases, a greater level of reduction in Poisson's ratio occurs. FRP composites, in general, show three main micro-damage types under uniaxial tensile loading: transverse crack, delamination, and fiber rupture. To determine micro-damage types that dominantly affect the relevant reduction in Poisson's ratio, glass fiber reinforced cross-ply laminates with three different off-axis ply contents are produced and tested under uniaxial tensile loading. The Acoustic Emission (AE) signals are concurrently recorded and grouped into three clusters in accordance with their frequency, which is either associated with transverse crack, delamination, or fiber rupture. The frequency-based clustering of the AE signal facilitates a detailed investigation of delamination onset and the effect of different micro-damage types on Poisson's ratio. It is proven that stacking sequences with a higher number of transverse cracks and delaminations, quantified based on AE signals, show a greater reduction in Poisson's ratio.

Keywords: Poisson's ratio, transverse cracking, glass fibers, acoustic emission

Introduction

FRP composites show a significant decrease in their elastic properties (axial elastic modulus $E_{xx} = \sigma_{xx}/\varepsilon_{xx}$ and Poisson's ratio, $\nu_{xy} = -\varepsilon_{yy}/\varepsilon_{xx}$ among others) when subjected to an axial strain until the fracture [1], [2]. Therefore, axial elastic modulus and Poisson's ratio which are measurable quantities using conventional sensor systems, lend themselves to monitoring the micro-damage state of composite materials. The reduction in these quantities is known to be associated with the accumulation of micro-damage created, such as transverse cracks, delamination, and fiber rupture, during the tensile loading of composite samples, since these micro-damage types could significantly alter the elastic properties of the composite samples. In comparison to the elastic modulus, Poisson's ratio of composite materials reveals a greater level of reduction under uniaxial loading conditions [3]. This is related to the fact that during uniaxial loading, Poisson's ratio remains as a function of a two-dimensional strain field, which makes Poisson's ratio more sensitive to the accumulation of micro-damage within FRP

composites in comparison with unidirectional elastic modulus, which is only dependent on a one-dimensional strain field.

In this study, we endeavor to answer two questions by using the principle of Acoustic Emission (AE). First, which micro-damage type(s) are more dominant in the reduction of Poisson's ratio. Second, how a stacking sequence affects the delamination onset. The effects of thickness of laminate and thickness to width ratio on delamination onset have been investigated in a series of papers for angle-ply laminates [4], [5], [6]. To the extent of our knowledge, there are not many studies on delamination onset in cross-ply laminates. AE has been used as a reliable method to determine micro-damage types in FRP composites [7], [8], [9]. The micro-damage formation inside the composite materials causes the initiation and propagation of transient elastic waves, which have been used to characterize the type and level of micro-damage in composite materials by using the features of transient elastic waves. The analysis of AE signals reveals a broad range of information about micro and macro damage behavior of FRP composites as well as the damage types. In literature, several studies have been conducted to classify the micro-damage types and micro-damage initiation and progress for FRP composites using the AE method. For example, for glass fiber reinforced materials, crack propagation [10] and micro-damage mechanism [11] processes have been investigated through analyzing AE signals. The initiation and propagation of transverse cracks for carbon fiber reinforced polymer have been investigated by modal decomposition of AE signals [12]. Micro-damage types have also been classified by conducting spectral analysis on the acquired AE signals [7], [13].

Materials and Methods

Glass fiber reinforcement (E-glass stitched fabric) purchased from Metyx (Turkey) with a trade code of L300 E10B-0 consists of 283 gsm warp fibers (600 Tex), 37 gsm weft fibers (68 Tex), and 10 gsm stitch (76 DTex). The glass fiber reinforcement is a unidirectional fiber where the weft fiber acts as a base for stitching to preserve the orientation of longitudinal fibers during the knitting, and makes the handling process easier. As a matrix material, Araldite LY 564 epoxy/XB3403 hardener system purchased from Huntsman (USA) is used. Vacuum-infusion method is employed to produce composite plates, which are then cured at 80 °C for 15 h. Three different composite plates with the stacking sequences of [90/90/0]s, [90/0/0]s, [0]6 are manufactured and coded referring to the number of off-axis fiber ply in each laminate, namely, S2, S1, and S0, respectively. All laminates have a thickness of between 1.7 and 1.8 mm. Tensile test coupons are cut and prepared out of these composite plates in accordance with ISO 527 standard and have a width of 25 mm.

In this study, a signal-based AE technique is used [15] such that the analogue signals are recorded and then converted into digital (A/D) signals, followed by a comprehensive data analysis to extract the relevant features. Acoustic emission signals are collected using a Mistras PCI-2 acoustic emission (AE) hardware and an AEwinPCI2-4 software with a sampling rate of 2 MHz. Two wide-band (WD) piezo-electric sensors (Pico Miniature AE sensor, Physical Acoustics) are attached to each specimen with a hot silicon gun.

Findings and Discussion

Clustering and localization of AE

Figure 1(a) yields a representative scatter plot of amplitude versus for cured epoxy resin. The signal cluster in the frequency range of 30–160 kHz is associated with the transverse cracks formed in the epoxy matrix. Figure 1(b) gives the scatter plot of amplitude versus frequency for the composite material with the stacking sequence of $[90/90/0]_s$ wherein one can observe three different cluster regions corresponding to the frequency ranges of 30–160 kHz, 160–350 kHz, and 350–550 kHz, related to transverse crack, delamination, and fiber rupture, respectively.

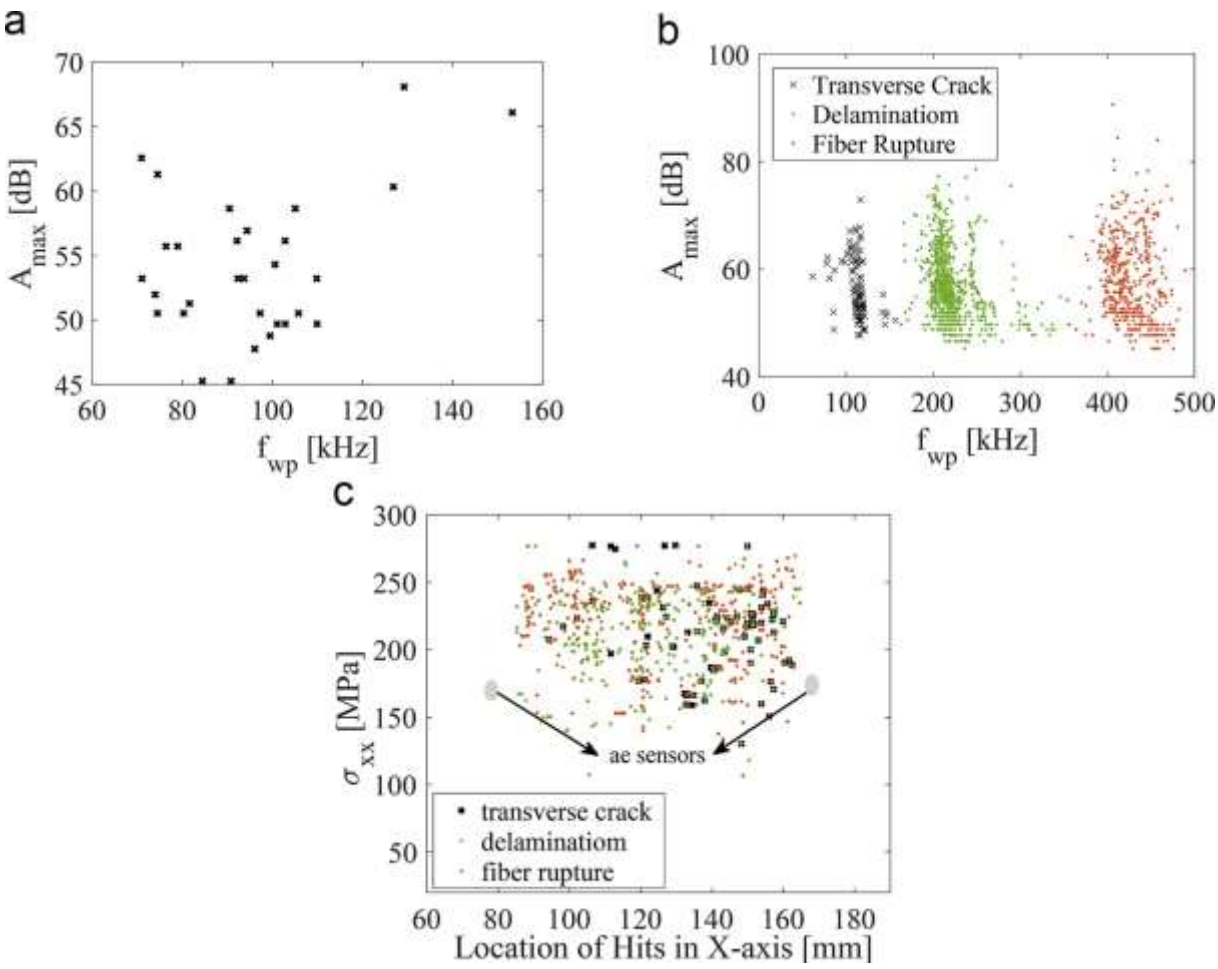


Figure 1. Representative plots of amplitude versus weighted peak frequency for cured neat **epoxy resin** (a), and composite sample (b), and the stress versus hit locations in x-direction (c).

Before the mechanical testing, the speed of sound () of S0, S1, S2 stacking sequences, as well as the epoxy matrix, is calculated for determining AE hits that participate in events between two sensors using the pencil-lead breakage or the so-called Hsu-Nielsen source method [16]. The source locations of hits are determined using a linear location analysis based on known quantities: the speed of sound and the arrival time of hits. For the analysis presented in this study, only the hits located between two sensors are considered, as shown Figure 1(c). The values of S0, S1, S2, and epoxy matrix are found to be 4257, 3807, 3449, and 1628 m/s,

respectively. The decrease in the content of E-glass fibers in the direction of speed of sound measurement leads to a decrease in the speed of sound, which can be associated with the higher value of elastic modulus of fibers in comparison to the epoxy matrix, recalling that elastic modulus is related to the speed of sound and density through a relation. Therefore, assuming a nearly constant density of composites with different stacking sequences, referring to their fiber volume fractions tabulated in Table 1, the increase in the elastic modulus results in an increase in the speed of sound. Figure 1(c) also reveals that fiber rupture occurs more dominantly at higher stress levels. On the other hand, the transverse crack and delamination spread over the whole stress domain.

Table 1. Mean (standard deviation) of mechanical properties.

Variables	**$[0]_6$**	**$[90/0/0]_s$**	**$[90/90/0]_s$**
Strength (σ_u) MPa	666 (50,6)	480 (37)	273 (4,9)
Elastic Modulus () (GPa)	29,44 (0,75)	20,9(0,67)	16,21 (0,62)
Fiber Volume Fraction (v_f) (%)	42,5	41,9	44,1
Maximum Poisson's ratio	0.268 (0,034)	0.140 (0,033)	0.116 (0,025)
Minimum Poisson's ratio	0.217 (0,016)	0.082 (0,025)	0.052 (0,008)
Weight percentage of off-axis plies	11	36	61
Percentage change in Poisson's ratio	19 (10,2)	41,5 (6,18)	53.5 (16,34)

Conclusion and Recommendations

The uniaxial tensile stress is applied to test coupons having three different stacking sequences to investigate the level of reduction in Poisson's ratio using in-situ AE signals acquired by an AE setup. The experimental results indicate that Poisson's ratio reveals a non-linear increase followed by a linear decrease for three different fiber lay-ups, namely, $[0/90/0]_s$, $[90/90/0]_s$, and $[0]_6$ during the static tensile testing. It is shown that the bigger the number of off-axis plies, the larger the reduction in Poisson's ratio. The factors behind the reduction in Poisson's ratio are investigated in terms of micro-damage evolution principles using the AE signals. These signals are classified with respect to their weighted peak frequencies, and three different clusters, corresponding to transverse cracks, delamination, and fiber rupture, were observed. The following important conclusions are derived from this study:

The level of reduction in Poisson's ratio is a lay-up dependent quantity and rises with the increase in the number of off-axis piles. The number of AE hits associated with transverse cracks and delamination indicates notable rises with the increase in the number of off-axis plies,

implying an obvious relationship between the level of reduction in Poisson's ratio and transverse cracks and delamination. It is shown that transverse cracks trigger and facilitate the formation of delamination, such that although, $[90/90/0]_s$ stacking sequence is of a tendency to suppress the occurrence of delamination, it has the largest number of delamination signals. Since the matrix material distributes the load across the fibers, if any micro-damage occurs within the matrix, such as delamination or a transverse crack, the applied axial load will not be smoothly transferred to the transverse direction by the matrix, hence causing a reduction in transverse strain, which is the main reason responsible for the reduction in Poisson's ratio.

Thanks and Information Note

The authors gratefully acknowledge support from the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) and the Ministry of Science, Industry, and Technology of Turkey, under grant numbers 112M357 and 01307.STZ.2012-1, respectively.

References

1. F. Gao, L. Boniface, S. Ogin, P. Smith, R. Greaves Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: Part 1. Observations of damage accumulation. Compos. Sci. Technol., 59 (1999), pp. 123-136
2. W. Van Paepegem, I. De Baere, E. Lamkanfi, J. Degrieck Monitoring quasi-static and cyclic fatigue damage in fibre-reinforced plastics by Poisson's ratio evolution Int. J. Fatigue, 32 (2010), pp. 184-196
3. P. Smith, J. Wood Poisson's ratio as a damage parameter in the static tensile loading of simple crossply laminates Compos. Sci. Technol., 38 (1990), pp. 85-93
4. J.C. Brewer, P.A. Lagace Quadratic stress criterion for initiation of delamination J. Compos. Mater., 22 (1988), pp. 1141-1155
5. T. Lorriot, G. Marion, R. Harry, H. Wargnier Onset of free-edge delamination in composite laminates under tensile loading Compos. Part B Eng., 34 (2003), pp. 459-471
6. N. Uda, K. Kunoo Edge Delamination of Composite Laminates Under Low Cycle Fatigue Proc of 12th Int Conf on Composite Materials, paper 312 2-9514526-2-4 (1999)
7. M. Kempf, O. Skrabala, V. Altstädt Acoustic emission analysis for characterisation of damage mechanisms in fibre reinforced thermosetting polyurethane and epoxy Compos. Part B Eng., 56 (2014), pp. 477-483
8. R. Gutkin, C. Green, S. Vangrattanachai, S. Pinho, P. Robinson, P. Curtis On acoustic emission for failure investigation in CFRP: pattern recognition and peak frequency analyses Mech. Syst. Signal Process., 25 (2011), pp. 1393-1407
9. C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T. Gan, P. Purnell, M. Pharaoh Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event Compos. Sci. Technol., 64 (2004), pp. 1819-1827

10. C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, C. Pappalettere Hybrid thermography and acoustic emission testing of fatigue crack propagation in Aluminum Samples J. Carroll, S. Daly (Eds.), Fracture, Fatigue, Failure, and Damage Evolution, Volume 5: Proceedings of the 2014 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer International Publishing, Cham (2015), pp. 247-252
11. V.R. Skal'skii, E.M. Stankevich, Y.Y. Matviiv A study of the features of the macrofracturing of composite materials Russ. J. Nondestruct. Test., 49 (2013), pp. 562-571
12. C. Baker, G.N. Morscher, V.V. Pujar, J.R. Lemanski Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: modal acoustic emission and peak frequency analysis Compos. Sci. Technol., 116 (2015), pp. 26-32
13. M.G.R. Sause, T. Müller, A. Horoschenkoff, S. Horn Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis Compos. Sci. Technol., 72 (2012), pp. 167-174
14. C. Yilmaz, C. Akalin, E.S. Kocaman, A. Suleman, M. Yildiz Monitoring Poisson's ratio of glass fiber reinforced composites as damage index using biaxial Fiber Bragg Grating sensors Polym. Test., 53 (2016), pp. 98-107
15. U.C. Grosse, M.L. Linzer Signal-based AE analysis C. Grosse, M. Ohtsu (Eds.), Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg (2008), pp. 53-99

SOĞUTMA AMAÇLI AL-CU FONSKİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ DAİRESEL KANATÇIK ÜRETİMİ

İbrahim ŞAFAK

Kayseri University, Vocational School of Technical Sciences, Kayseri -Türkiye **(**Corresponding Author) ORCID: 0000-0002-0807-320X

Recep GÜNEŞ

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri - Türkiye

ORCID: 0000-0001-8902-0339

Fehmi NAİR

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri – Türkiye

ORCID: 0000-0003-3519-6771

Özet

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, sahip oldukları yüksek ısı iletim performansı sayesinde özellikle doğal taşınım yoluyla soğutma gerektiren uygulamalarda önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, savunma sanayisinden sağlık sektörüne kadar geniş bir uygulama yelpazesinde potansiyel kullanım alanına sahiptirler.Bu çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) kullanılarak dairesel kanatçıkların üretim sürecini kapsamaktadır. Üretilen FDM kanatçıklar, kademeli bileşim geçişine sahip dört ayrı katmandan oluşmaktadır. Birinci katman %100 Al, ikinci katman %89 Al - %11 Cu, üçüncü katman %11 Al - %89 Cu ve dördüncü katman ise %100 Cu içermektedir.Üretim sürecinin ilk aşamasında, saf Al ve Cu katmanları hazırlanmış; bu malzemelerin yoğunlukları ölçülerek literatürdeki verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir. Devamında, derecelendirilmiş ara katmanların üretimine geçilmiştir. İkinci katman, 125 MPa basınç altında, 480 °C sıcaklıkta 1,5 saat sinterlenerek elde edilmiştir. Bu üretim yöntemi beş farklı tekrarla uygulanarak süreç doğrulanmıştır. Üçüncü katman ise 650 °C sıcaklık ve 125 MPa basınç altında 2 saat boyunca sinterlenerek, dördüncü katmanla benzer şekilde üretilmiştir. İkinci katmanın üretimi, Al ve Cu katmanlarının birleşiminde seramik faz oluşumunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Seramik fazın oluşumu, malzeme içinde homojenliğin sağlanamadığını, bunun da ısı transfer performansını olumsuz etkilediğini ve malzemenin daha gevrek bir yapıya sahip olmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu durum, sinterleme sıcaklığının mikro yapı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Al_2Cu fazının oluşumu, matris yapısıyla zayıf bir arayüz oluşturarak çatlak ilerlemesine zemin hazırlamakta ve böylece malzemenin sünekliğini azaltmaktadır. nedenle, sinterleme sıcaklığının kontrollü bir şekilde optimize edilmesi, istenmeyen fazların oluşumunu engellemek ve numunenin mekanik bütünlüğünü korumak açısından kritik öneme sahiptir. Yürütülen sinterleme çalışmaları sonucunda, 500 °C'nin üzerinde işlem gören numunelerde Al_2Cu seramik fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazın mikroyapıda ortaya çıkması, özellikle mekanik performans üzerinde belirgin bir etki yaratmış ve numunelerin kırılganlıklarında gözle görülür bir artışa neden olmuştur. Al_2Cu fazı, matris ile arasında zayıf bir bağ arayüzü oluşturarak çatlakların kolayca ilerlemesine zemin hazırlamaktadır. Bu durum, malzemenin

sünekliğini azaltmakta ve yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkların, difüzyon mekanizmalarını hızlandırarak bu tür istenmeyen intermetalik fazların oluşumunu teşvik ettiği değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, sinterleme sıcaklığının dikkatle optimize edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Özellikle, 500 °C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemlerin, hem faz kararlılığı hem de mekanik dayanım açısından daha elverişli sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-Cu Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kanatçık, Sinterleme, Al_2Cu Seramik Fazı, Üretim, Isı Transferi

Abstract

Functionally graded materials (FGMs) are gaining importance in applications that require This study investigates the production parameters of Al-Cu functional graded circular fins for cooling purposes in Al tubes. The functional grading of the fin material varies radially from Al at the inner diameter to Cu at the outer diameter. Initially, the material composition along the fin was determined through numerical analyses to ensure a uniform temperature distribution. The selected material composition (m=10) results in a nonlinear, rapid transition from Al at the inner diameter to Cu at the outer diameter. This transition is achieved with four distinct layers in the radial direction. The first layer is 100% Al, the second layer consists of 89% Al and 11% Cu, the third layer consists of 11% Al and 89% Cu, and the fourth layer is composed of 100% Cu. However, according to the determined material composition, the fourth layer, consisting of 100% Cu, constitutes 89% of the fin radially. In the first stage of the manufacturing process, pure Al and pure Cu layers were prepared, and these layers were successfully produced by sintering 10-micron Al and 10-micron Cu powders under suitable conditions. Subsequently, the production of the graded intermediate layers was carried out. The second layer, consisting of an 89% Al and 11% Cu mixture, was obtained by sintering at 125 MPa pressure and 480°C for 1.5 hours. The third layer, consisting of an 11% Al and 89% Cu mixture, was produced by sintering at 650°C and 125 MPa pressure for 2 hours. During the production of the third layer, the formation of the Al_2Cu ceramic phase was observed in the mixture of Al and Cu powders. The formation of the ceramic phase indicates that homogeneity was not achieved within the material, which adversely affected the heat transfer performance and caused the material to become more brittle. Especially in a fin expected to improve heat transfer, the ceramic phase formed due to the production conditions inevitably has the opposite effect. This highlights the impact of sintering temperature on the microstructure. Therefore, the controlled optimization of the sintering temperature is crucial to prevent the formation of unwanted ceramic phases in FDM structures and to maintain the mechanical integrity of the sample. As a result of various sintering studies, it was found that Al_2Cu ceramic phase formation occurs in samples processed at temperatures above 500°C. Thus, it was concluded that processing at temperatures below 500°C in Al-Cu FDM structures yields more favorable results in terms of phase stability, mechanical strength, and heat transfer.

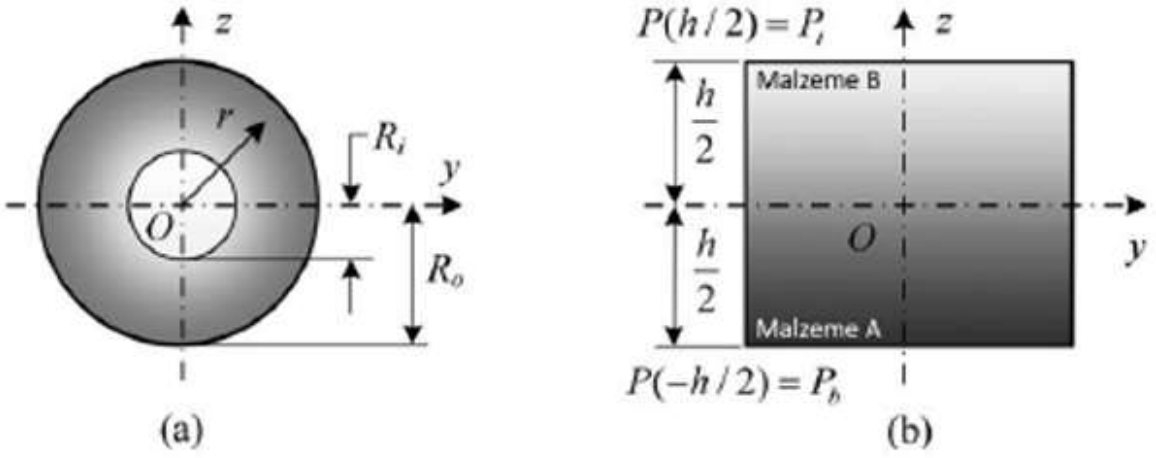
Keywords: Al-Cu Functional Graded Fin, Sintering, Al2Cu Ceramic Phase, Manufacturing, Heat Transfer

Giriş

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, bileşimlerinin ve dolayısıyla fiziksel, kimyasal veya mekanik özelliklerinin uzaysal koordinatlara bağlı olarak sürekli biçimde değiştiği heterojen yapılar olarak tanımlanır. Bu tür malzemelerde, kompozisyonel veya mikroyapısal değişim, genellikle belirli bir yönde kademeli olarak gerçekleşir ve bu sayede malzeme, farklı çalışma koşullarına uyum sağlayacak şekilde özelleştirilebilir. Böylece, klasik çok katmanlı malzemelere kıyasla ara yüzey gerilmeleri azaltılarak performans ve dayanıklılık artırılabilir (Rao vd., 2013). Genellikle metal ve seramik malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bu heterojen yapılarda, malzeme özellikleri geometrik parametrelere bağlı olarak—örneğin yükseklik veya yarıçap doğrultusunda—her bir katmanda farklılık gösterebilir. Bu özellik dağılımı, malzemenin belirli bir yönde kademeli olarak değişen yapısal özellikler sergilemesini sağlar ve böylece fonksiyonel performansın uygulama gereksinimlerine uygun biçimde optimize edilmesine olanak tanır (Miyamoto vd., 1999).

FDM (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme) yapılarında, malzeme özelliklerinin derecelendirilmesi farklı kesit geometrilerine bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Bu bağlamda, derecelendirme genellikle şu iki temel kesit tipi üzerinden incelenmektedir:
a) **Dairesel kesit**: Özelliklerin merkezden çevreye veya tersi yönde sürekli değiştiği yapı tipidir. Bu tür derecelendirme, genellikle silindirik ya da halka biçimli bileşenlerde tercih edilir.
b) **Dikdörtgensel kesit**: Malzeme özelliklerinin, genellikle yükseklik veya genişlik boyunca değiştiği yapı tipidir. Bu yaklaşım, prizmatik ya da tabakalı yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılır (Gayen vd., 2019).

Her iki kesitte de amaç, malzeme performansını belirli mekanik, termal veya fonksiyonel gereksinimlere göre optimize etmektir.



Şekil 1. Dairesel kesitli ve diktörtgen kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler

Yapılan bu çalışmada, dairesel geometriye sahip kanatçıkların termal performansını artırmak temel hedef olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, ısıl iletkenlik katsayısı yüksek olan malzemelerin tercih edilmesi, termal verimliliğin maksimize edilmesi açısından en uygun yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kanatçıkların üretiminde, yüksek termal iletkenliğe sahip olan alüminyum ve bakır malzeme kombinasyonu tercih edilmiştir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), farklı malzeme kombinasyonlarıyla üretilebilmekte olup, malzeme kompozisyonunun geometrik yönelime bağlı olarak **sürekli (continuous-graded)** veya **aşamalı (stepwise-graded)** şekilde sınıflandırılması mümkündür (El-Galy vd., 2019; Miyamoto vd., 1999).

Sürekli derecelendirilmiş yapılarda, malzemenin iç yapısında belirgin bir ayrım çizgisi gözlemlenmez; başka bir ifadeyle, komşu bölgeler arasında keskin ara yüzeyler bulunmaz (El-Galy vd., 2019). Bu nedenle, hem kompozisyon hem de mikroyapıdaki değişim, konuma bağlı olarak kesintisiz ve düzgün bir biçimde gerçekleşir. Öte yandan, aşamalı derecelendirilmiş yapılarda bu değişim, birbirinden ayrı ve belirgin katmanlar şeklinde meydana gelir; dolayısıyla malzeme içindeki geçişler süreksizdir ve katmanlar arasında ayrım net bir biçimde izlenebilir (Udupa vd., 2014).

Yontar ve arkadaşları (Yontar vd., 2020), tamamlayıcı fonksiyon metodunu kullanarak fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel kanatçıklar için tek boyutlu ısı iletim problemini genel bir çözüm çerçevesinde ele almıştır. Çalışmada, termal iletkenlik katsayısının radyal konuma bağlı olarak belirli bir kuvvet ve üs formunda değiştiği iki farklı senaryo analiz edilmiş ve bu senaryolar yarı-iteratif bir teknik aracılığıyla çözümlenmiştir. Bu yaklaşımla, farklı derecelendirme katsayılarına bağlı olarak radyal doğrultuda sıcaklık dağılımı, ısı transfer oranı, kanat verimi ve etkinliği hesaplanmıştır. Sonuçlar, termal iletkenliğin kademelendirme parametresinin yüksek olduğu ve düşük ısı transfer katsayısının bulunduğu ortamlarda FD dairesel kanatçıkların oldukça başarılı bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Hassanzadeh ve Pekel (Hassanzadeh & Pekel, 2016), fonksiyonel dereceli dairesel kanatçıkların termal davranışını ortalama değer teoremini esas alarak analitik yöntemle incelemiştir. Çalışmada, malzeme özelliklerinin kanatçık yarıçapı boyunca doğrusal olarak değiştiği varsayılmış ve ayrıksılık indeksinin kanatçığın termal özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, bu indeksin artışıyla birlikte ısı dağılımı daha verimli gerçekleşmekte, termal direnç azalmakta ve homojen yapılarla kıyaslandığında FDM'lerin ısı transferi ile kanat veriminde önemli bir artış sağladığı görülmektedir.

Gaba ve çalışma arkadaşları (Gaba vd., 2014), parabolik kesitli dairesel FD kanatçıkların ısıl performansını analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı kesit ve derecelendirme parametreleri dikkate alınarak sıcaklık gradyanı, kanat verimi ve etkinliği hesaplanmıştır.

Termal özelliklerin radyal eksende güç fonksiyonu aracılığıyla derecelendirildiği bu çalışmada, ikinci dereceden diferansiyel denklemler türetilmiş ve sonuçlar, kanatçığın kesit parametreleri ile derecelendirme biçimi arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Haghighi (Haghighi, 2016), kalınlığı sabit olmayan ve yalnızca uç sıcaklığı bilinen bir fonksiyonel dairesel kanatçığın tabanında zamanla değişen ısı akısını belirlemek amacıyla ters ısı iletim yöntemini uygulamıştır. Fourier dışı ısı iletim denklemleri temel alınarak yapılan çalışmada, çözüm için konjuge gradyan metodu (KGM) ve artırımlı diferansiyel quadrature yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yöntemin hem yüksek doğruluk hem de kısa çözüm süresi açısından verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Yıldırım ve arkadaşları (Yıldırım vd., 2021), aksiyal simetriye sahip fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel bir kanatçığın termal dalga yayılımı ve verim analizini gerçekleştirmiştir. Radyal eksende Mori-Tanaka homojenleştirme şeması kullanılarak malzeme özellikleri kademelendirilmiş ve kanatçığın tabanında 1040 karbon çeliği, ucunda ise alüminyum kullanılmıştır. Chebyshev pseudospektral yöntemiyle elde edilen sonuçlar, FD yapının yüksek sıcaklıklarda alüminyumdan daha iyi, verim açısından ise çelikten üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Lee ve çalışma arkadaşları (Lee vd., 2012), fonksiyonel dereceli bir kanatçığın zamanla değişen taban ısı akısını, kanatçık üzerindeki sıcaklık ölçümlerini kullanarak ters çözüm yöntemiyle tahmin etmişlerdir. Konjuge gradyan metodu ve fark prensibi kullanılan bu çalışmada, bilinmeyen özelliklerin fonksiyonel formunun bilinmesine gerek duyulmadan oldukça tutarlı tahminler elde edilmiştir.

Ranjan ve ekibi (Ranjan & Mallick, 2018), fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel bir kanatçığın termomekanik davranışlarını hem analitik hem de nümerik yöntemlerle analiz etmiştir. Malzeme özelliklerinin radyal yönde değiştiği kabul edilmiş, ısı üretimi ve ısı transfer katsayısı ise sıcaklığa bağlı fonksiyonlar olarak modellenmiştir. Homotopi pertürbasyon metodu (HPM) ve klasik elastisite teorisiyle yapılan analizler, ANSYS yazılımıyla doğrulanmıştır. Bu kapsamda, radyasyon, taşınım, termal iletkenlik ve genleşme katsayısındaki değişimlerin termal gerilmelere etkileri kapsamlı biçimde ortaya konmuştur.

Güneş R. ve ekibi (Arslan & Gunes, 2023) yapmış oldukları çalışmayla SiC/AA6061 fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların balistik darbe altındaki nüfuz ve hasar mekanizmaları deneysel olarak incelenmiştir. Metal yoğun gradyanlı plakalar sünek, seramik yoğun plakalar ise gevrek hasar göstermiştir. Sürekli lineer kompozisyon değişimi, çatlak büyümesini ve kırılmayı engelleyerek darbe direncini artırmaktadır. Bulgular, seramik/metal fonksiyonel zırh tasarımına önemli katkı sağlamaktadır.

Aziz ve Torabi (Aziz vd., 2013), FDM yapıda ve homojen yapıda tasarlanmış radyal kanatçıkların termal performanslarını karşılaştırmışlardır. Kanatçıkta taban kısmında konvektif ısıtma, uç kısmında ise konvektif ve radyatif soğutma etkili olarak ısı transferi gerçekleştirilmiştir. İç kısımda sabit ısı üretimi varsayılmış, homojen yapı için termal iletkenlik

sıcaklığa bağlı olarak modellenirken, FD yapı için bu özellik boyutsuz radyal koordinatın doğrusal fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Diferansiyel dönüşüm yöntemi (DTM) ile yapılan çözüm, çeşitli boyutsuz parametrelerin termal performans üzerindeki etkilerini açıkça göstermiştir.

Son olarak, Aziz ve Rahman (Aziz & Rahman, 2009), dikdörtgen kesitli bir fonksiyonel dereceli radyal kanatçığın termal performansını analiz etmişlerdir. Sabit taban sıcaklığı ve yalıtımlı uç sınır koşulları altında, sıcaklık dağılımı, ısı transfer oranı, verim ve etkinlik gibi performans göstergeleri; üstel güç kanunu kullanılarak Airy dalga fonksiyonları, modifiye edilmiş Bessel fonksiyonları ve hiperbolik fonksiyonlar yardımıyla elde edilmiştir. Bu analizler sonucunda, termal iletkenliğin yarıçapın karesiyle ters orantılı olarak değiştiği durumlarda en yüksek performans değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir.

Literatür detaylı olarak incelendiğinde FD kanatçıkların üretim aşamalarının yer aldığı ve soğutma amaçlı kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durum, ilgili araştırma alanları ve uygulama sahalarında belirgin ve kritik bir bilgi boşluğunu ortaya koymaktadır. Mevcut literatürde bu konuya dair yeterli kapsamlı çalışma bulunmaması, hem teorik hem de pratik anlamda önemli bir eksikliğe işaret etmektedir. Bu bağlamda, yürütülen bu kapsamlı tez çalışması, literatürdeki söz konusu boşluğu sistematik ve detaylı bir şekilde ele alarak, alana özgün katkılar sunmayı ve bilgi eksikliğini gidermeyi amaçlamaktadır. Böylece hem akademik bilgi birikimine hem de uygulama pratiklerine temel teşkil edecek nitelikte önemli bulgular elde edilmesi hedeflenmektedir.

Materials and Methods

İlk aşamada, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kanatçıkların sayısal modellemesi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu süreç kapsamında, kanatçıkların hem geometrik yapıları hem de fiziksel özellikleri titizlikle modellenmiş ve bu amaçla ileri düzey bir sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modellemenin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için farklı sınır koşulları ile malzeme özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır. Özellikle, malzeme parametrelerinin uzaysal değişimine bağlı olarak oluşabilecek etkiler modellenmiş ve sınır koşullarının gerçek çalışma şartlarını yansıtmasına özen gösterilmiştir. Bu kapsamlı modelleme çalışması, FD kanatçıkların termal ve mekanik performanslarının ayrıntılı analizini mümkün kılmakta olup, farklı tasarım değişkenlerinin sistem üzerindeki etkilerinin sistematik bir şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla, sayısal modelleme yalnızca mevcut tasarımların performansını değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda yeni tasarım stratejilerinin geliştirilmesi ve optimize edilmesinde de kritik bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın sayısal modelleme aşaması, fonksiyonel derecelendirilmiş kanatçıkların etkinliğinin artırılmasına yönelik bilimsel ve mühendislik yaklaşımlarına temel oluşturmaktadır.

İkinci aşamada, fonksiyonel derecelendirilmiş kanatçıkların üretim süreçleri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu kapsamda, üretimde kullanılan malzeme seçim kriterleri, tercih edilen üretim teknikleri ve bu tekniklerin sahip olduğu avantajlar ile dezavantajlar detaylı ve

sistematik bir biçimde incelenmiştir. Özellikle, kanatçıkların performansını doğrudan etkileyen optimum kompozisyonun belirlenmesi süreci, üretim aşamasının en kritik ve hassas bileşeni olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, farklı malzeme bileşimlerinin mekanik ve termal performans üzerindeki etkileri hem deneysel testler hem de sayısal analiz yöntemleri kullanılarak titizlikle araştırılmıştır. Optimum kompozisyonun tespiti, kanatçıkların işlevsellik, dayanıklılık ve verimlilik gibi temel performans kriterleri açısından en yüksek standartları karşılayacak şekilde tasarlanabilmesi için vazgeçilmez bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, bu süreçte malzeme bileşimindeki varyasyonların üretim yöntemleriyle uyumu ve uygulama alanlarındaki gereksinimlere uygunluğu da detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, üretim sürecine ilişkin bu kapsamlı analiz, fonksiyonel derecelendirilmiş kanatçıkların performansını maksimize edecek ve kullanım ömrünü uzatacak şekilde tasarım ve üretim stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir temel sağlamaktadır.

Üçüncü aşamada, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) ve homojen kanatçıkların imalatında toz metalürjisi yöntemleri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde, toz metalürjisi tekniklerinin temel prensipleri, uygulama süreçleri ve kanatçık üretimindeki kritik rolleri detaylı biçimde incelenmiştir. Toz metalürjisi, özellikle malzemelerin mikroyapısal özelliklerinin hassas kontrolüne olanak sağlaması ve karmaşık bileşenlerin yüksek performansla üretilebilmesi açısından büyük avantajlar sunan gelişmiş bir imalat yöntemi olarak öne çıkmaktadır. İmalat sürecinin başarısı ve nihai ürünün özellikleri büyük ölçüde kullanılan tozların fizikokimyasal özelliklerine, sinterleme sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Bu bağlamda, tozların tane boyutu, kimyasal bileşimi, dağılımı ve saflık düzeyleri titizlikle değerlendirilmiş, ayrıca sinterleme parametrelerinin malzemenin yoğunluğu, gözenekliliği, mekanik dayanımı ve termal özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında uygulanan sıcaklık ve süre optimizasyonu, malzeme yapısının homojenliği ve fonksiyonel gradyasyonun sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, toz metalürjisi sürecinde ortaya çıkabilecek potansiyel sorunlar ve bunların çözümüne yönelik stratejiler de literatür ışığında ele alınmıştır. Sonuç olarak, toz metalürjisi yöntemlerinin fonksiyonel derecelendirilmiş ve homojen kanatçıkların üretiminde sağladığı mikro yapısal kontrol ve performans iyileştirmeleri, bu yöntemi ileri mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez kılmaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme, toz metalürjisi tekniklerinin kanatçık imalatındaki rolünü bilimsel ve teknolojik boyutlarıyla derinlemesine ortaya koymaktadır.

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Dairesel Kanatçıkların Sayısal Analizi

Fonksiyonel derecelendirilmiş yapıların tercih edilmesindeki temel amaç, yüksek ısıl iletkenliğe sahip alüminyum ve bakır malzemelerinin birlikte kullanılması yoluyla kanatçıkların doğal taşınımla gerçekleşen ısı transferinin optimize edilmesidir. Bu yapıda, taban alüminyumdan, uç ise daha yüksek ısıl iletkenlik sağlayan bakırdan oluşmakta olup, iki malzeme arasındaki hacimsel oran radyal yönde sürekli olarak değişmektedir. Hacimsel oran ve malzeme özellikleri, kanatçığın yarıçapı doğrultusundaki herhangi bir noktada konum ve yoğunluğun fonksiyonu olarak modellenmektedir.

$$q(r) = q_{Al} \cdot V_{Al} + q_{Cu} \cdot V_{Cu} \quad (1)$$

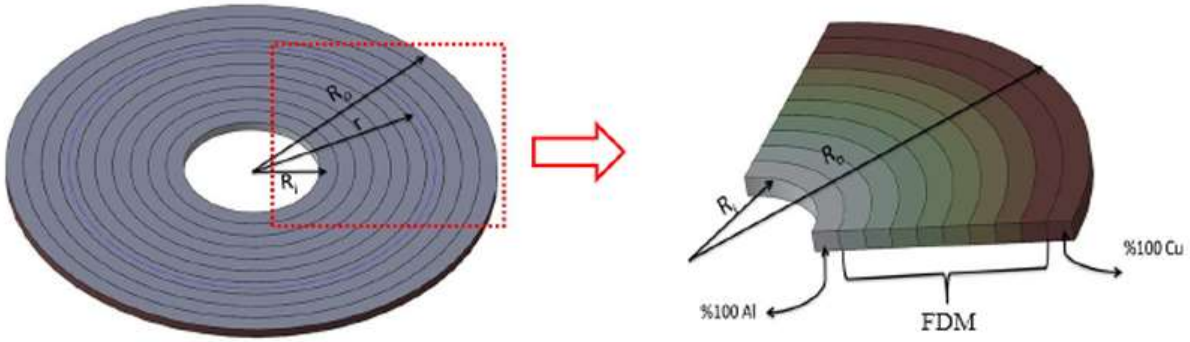
Alüminyum bileşenleri ve bakır bileşenleri arasındaki hacimsel oranları veren ilişki ise;

$$V_{Al} + V_{Cu} = 1 \quad (2)$$

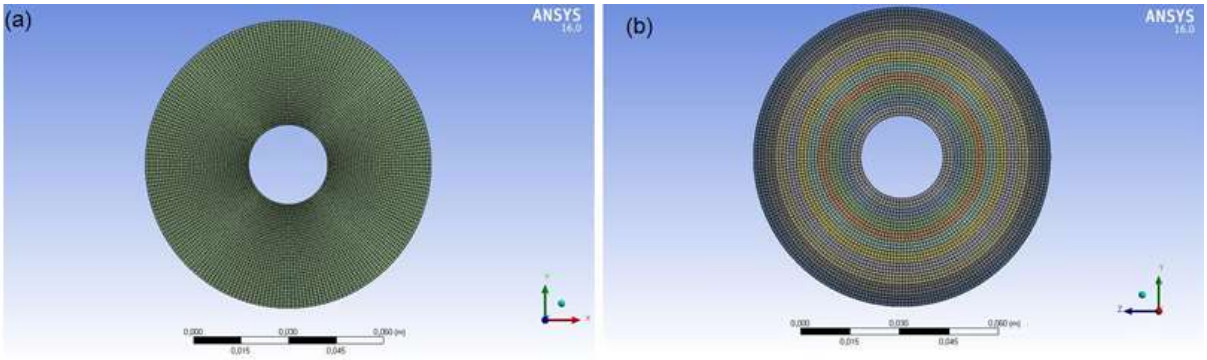
Bakır bileşeninin oranı ise dairesel bir kanatta kanatçık uzunluğu boyunca konumun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde bulunur.

$$V_{Cu}(r) = \left(\frac{R_0 - r}{R_0 - R_i}\right)^m \quad (3)$$

Bu ifade de yer alan n üstel değeri hacimsel oranı kontrol eden keyfi bir üstür. Bu m değeri hesaplanması için bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup radyal doğrultuda sıcaklık dağılımları incelenerek optimum değer bulunmuştur.

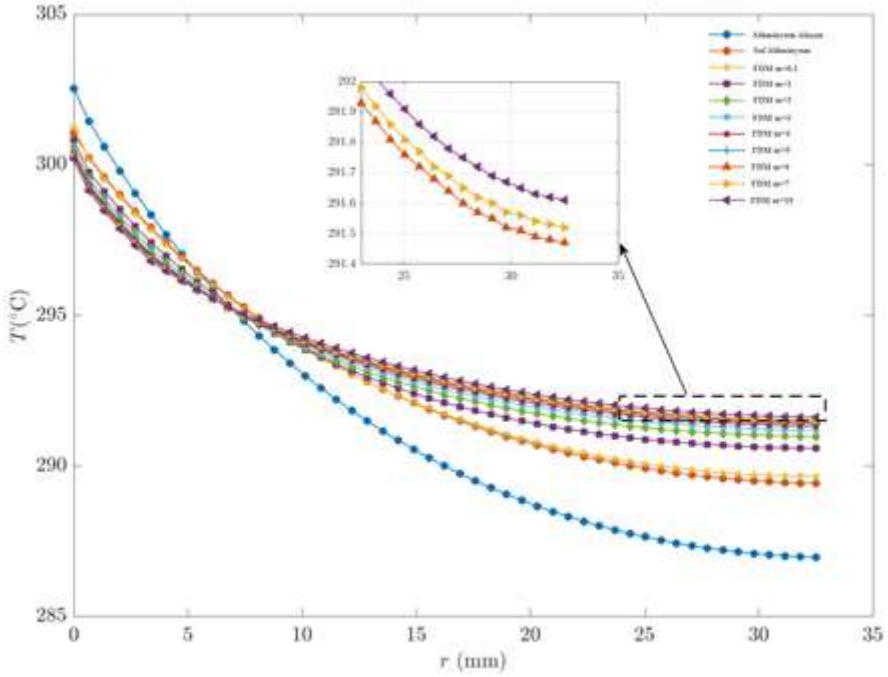


Şekil 2. Fonsiyonel Derecelendirilmiş(FD) Dairesel Kanatçık



Şekil 3. Sonlu elemanlar analizi mesh yapısı a) Homojen kanatçık b) FD kanatçık

Gerçekleştirilen analizlerde FD ve homojen kanatçık sıcaklık dağılımları incelenmiş farklı m üstel değerleri için taban ve kanatçık ucu sıcaklıkları karşılaştırıldığında m=10 için sıcaklık farkının minimum olması m değerinin optimum olduğunu göstermiştir.



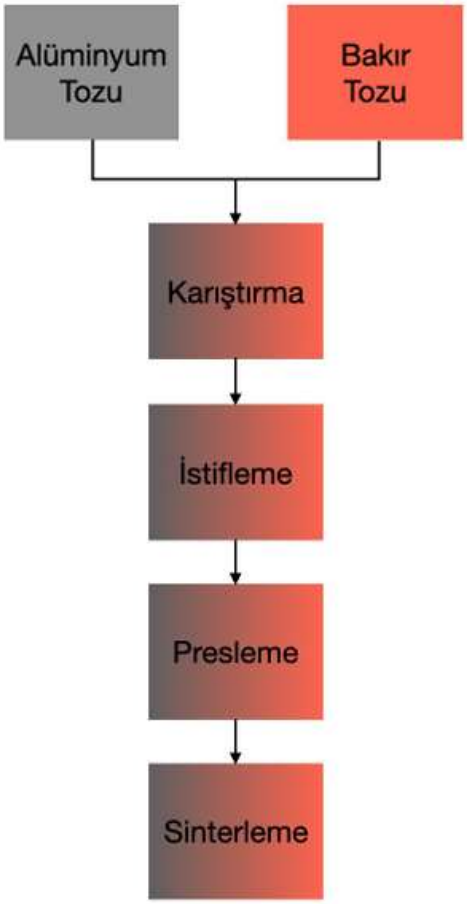
Şekil 4. Farklı m değerleri için radyal doğrultuda sıcaklık değişimleri

Belirlenen m değeri için ise kanatçık katmanlarında yer alan hacimsel oranlar aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 1. FD kanatçığın m=10 kompozisyonel üssüne göre hacimsel oranları

Katman	Al Oranı (%)	Cu Oranı (%)
1.Katman	100	0
2.Katman	65	35
3.Katman	11	89
4.Katman	3	97
5.Katman	0,6	99,4
6.Katman	0,01	99,9
7.Katman	0,0104	99,98
8.Katman	0,0005	99,995
9.Katman	0,0001	99,999
10. Katman	0	100

Belirlenen bu oranlara göre FD kanatçık üretimi sırasıyla alüminyum ve bakır tozlarının karıştırılması, isitifleme, presleme ve sinterleme olarak dört aşamada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Üretim aşamaları

Farklı hacimsel oranlara sahip her katmanın kendi içinde homojen dağılıma sahip olması kritik bir önem oluşturduğundan Tablo 1'de yer alan hacimsel oranlara göre hem alüminyum hem bakır tozları için her katman için ayrı ayrı ağırlıkları hesaplanarak ritmik hareket yapan bir karıştırıcıda 12 saat boyunca karıştırılmıştır. Ardından elde edilen karışım AISI 2344 sıcak iş çeliğinden imal edilmiş olan kalıba aktarılarak önce istifleme sonra presleme ve ardından sinterleme işlemiyle kanatçık üretimi yapılmıştır.



Şekil 6. Karışımın kalıba alınması ve presleme

Şekil 7'de ise hem atmosfer hem de vakum ortamına sahip sıcak pres ünitesi yer almaktadır. Sinterleme işlemi koşulları ise Tablo 2'de özetlenmiştir.



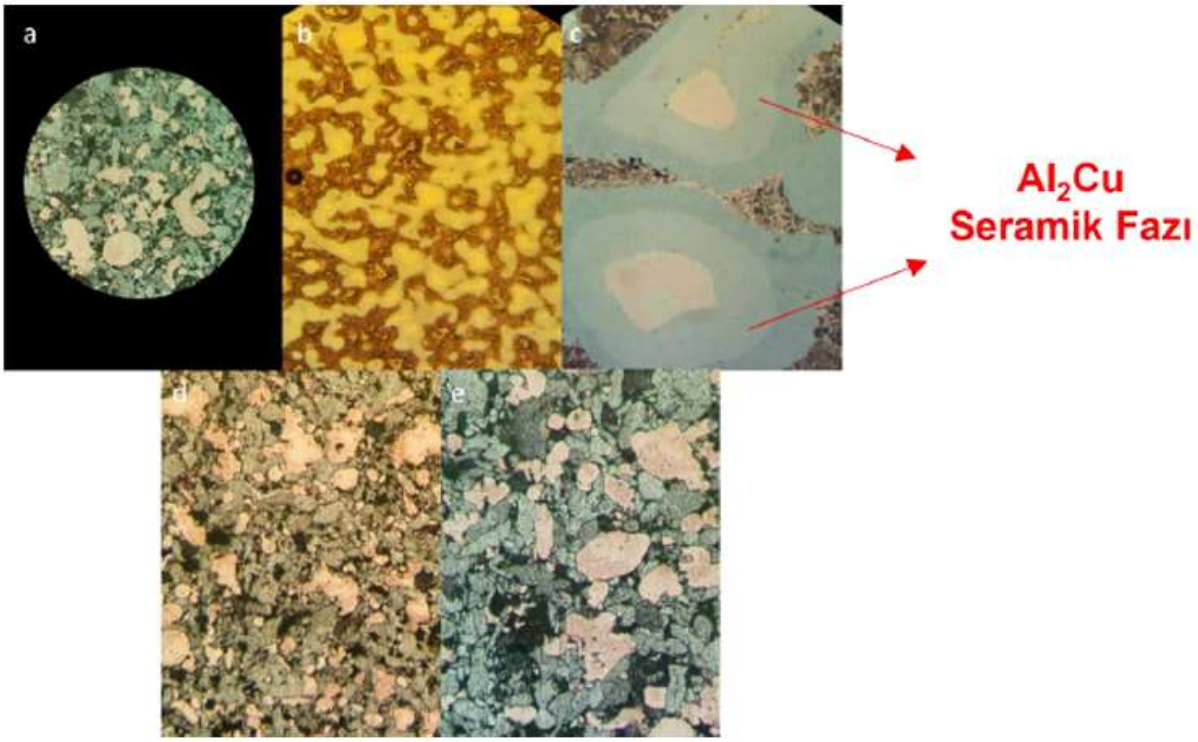
Şekil 7. Sıcak pres ünitesi

Tablo 2'de yer alan sinterleme parametreleri, ilgili faz diyagramları ve literatürdeki çalışmalar göz önünde bulundurularak belirlenmiş, her bir katmanın üretimi bu koşullara

uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.Ancak, %65 alüminyum ve %35 bakır içeren ikinci katmanın üretimi sırasında seramik faz oluşma ihtimali bulunduğundan, bu katmana ait en uygun üretim parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla detaylı bir araştırma süreci yürütülmüştür. Bu süreç kapsamında, ikinci katman için beş farklı örnek hazırlanmış ve her birinin mikro yapısı ile sertlik değerleri analiz edilmiştir.Yapılan analizler sonucunda, 500 °C ve üzeri sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde Al_2Cu seramik fazının oluştuğu ve bunun malzemenin kırılganlığını artırdığı gözlemlenmiştir.Tablo 3'teki analiz bulguları ve Şekil 28'de yer alan mikroskobik görüntüler doğrultusunda, en uygun sinterleme sıcaklığının 480 °C, uygulanan basıncın ise 125 MPa olduğu belirlenmiş ve üretim bu parametreler esas alınarak tamamlanmıştır.Bu şekilde, her bir bileşim oranına göre FD plakalarının üretim süreci başarıyla tamamlanmıştır.

Tablo 2. Numunelere ait sinterleme koşulları ve sertlik değerleri

Numune	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Basınç (MPa)	Süre (Dakika)	Sertlik (HRT)
a	650	62.5	60	87.2
b	550	62.5	60	86.17
c	420	62.5	60	13.06
d	480	125	90	45.92
e	500	125	90	68.87

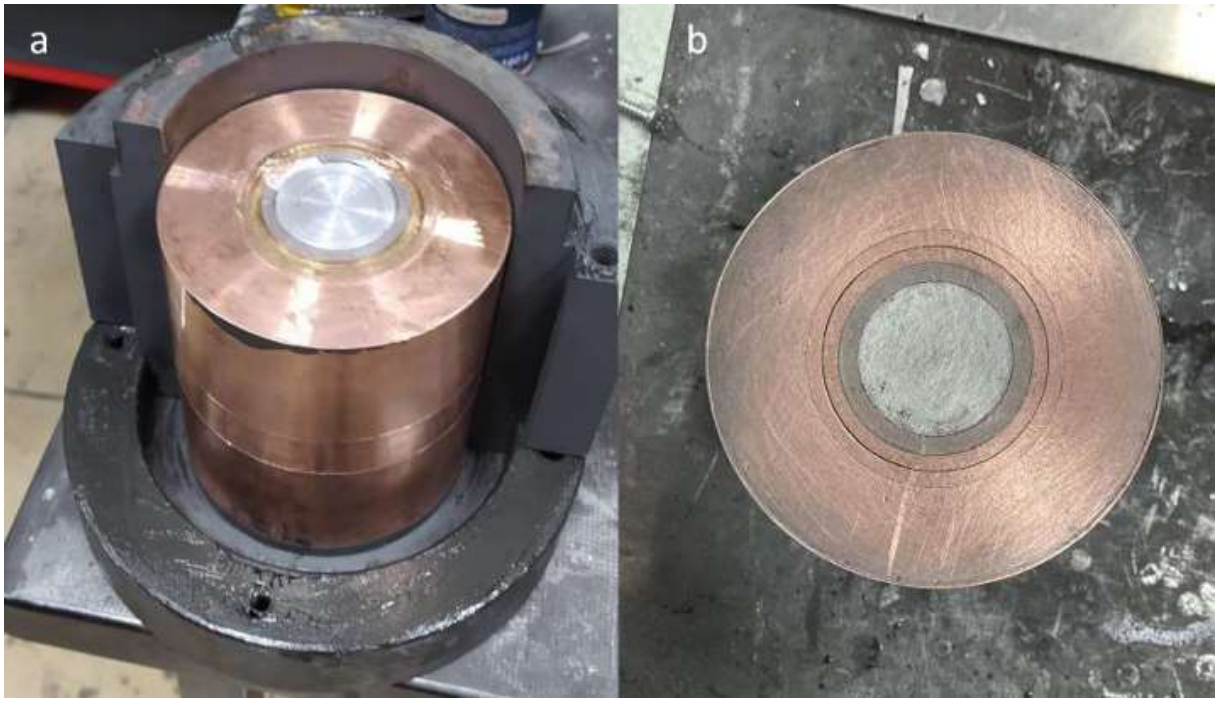


Şekil 8. %65 Al – %35 Cu bileşimine sahip numunelere ait iç yapı analizleri

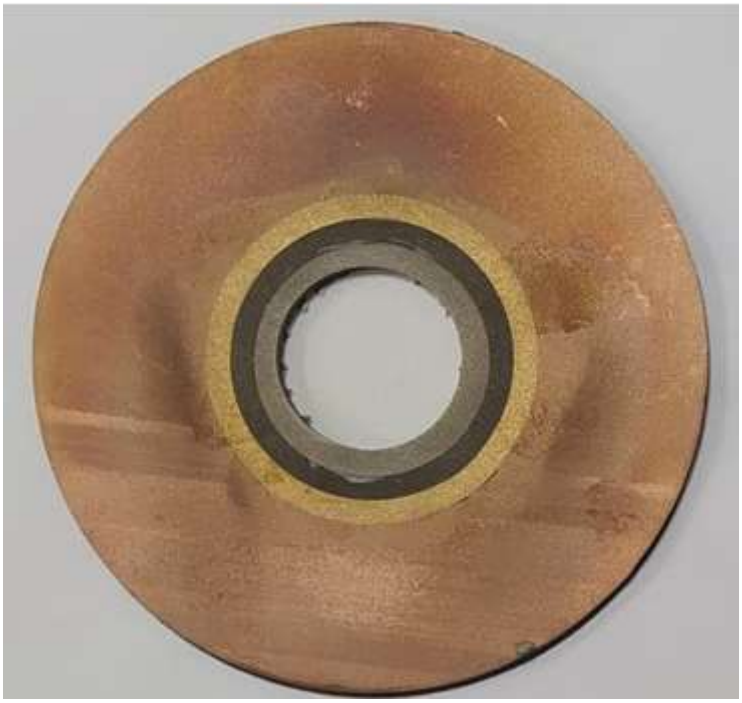
Her bir hacimsel oran için üretilen silindirik bloklar, Şekil 9'da gösterildiği üzere tel erozyon yöntemiyle uygun boyutlarda işlenmiş ve bu sayede fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel kanatçığın katmanlarını oluşturan silindirik parçalar elde edilmiştir. Şekil 9'te gösterilen silindirik bloklar, ultrasonik temizleme cihazında yüzey temizlikleri sağlandıktan sonra, Şekil 10'te görüldüğü üzere birleştirilerek kalıba yerleştirilmiş ve 500 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında kademeli olarak bütünleşen bloklar, tel erozyon yöntemiyle 2.5 mm kalınlığında dilimlenmiş ve böylece Şekil 11'de gösterilen, 90 mm çapında ve 2.5 mm kalınlığında FD kanatçıkların üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 9. İstenilen ölçülere getirilen silindir blokları



Şekil 10. Birleştirilen katmanların kalıba alınması ve sinterlenmiş hali



Şekil 11. Üretilen FD Kanatçık

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, 10 katmandan oluşan ve ilk katmanı %100 Alüminyum (Al), son katmanı ise %100 Bakır (Cu) olarak derecelendirilmiş dairesel fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) yapısına sahip bir kanatçığın ısı transfer performansı araştırılmıştır.. Alüminyumun düşük yoğunluk ve yüksek oksidasyon direncine sahip olması ile birlikte, bakırın yüksek termal iletkenlik özellikleri yapının her iki yönden avantaj sağlamasına olanak tanımıştır. Katmanlı yapı boyunca bileşimin kademeli olarak değiştirilmesiyle, hem termal iletkenlikte hem de malzeme yoğunluğunda düzgün bir geçiş sağlanmış ve bu sayede ani değişimlere bağlı termal stres oluşumu minimize edilmiştir. Yapılan analizlerde, geleneksel tek malzemeden üretilmiş kanatçıklarla karşılaştırıldığında, FDM kanatçığın ortalama yüzey sıcaklığını daha hızlı düşürdüğü, böylece daha etkin bir ısı uzaklaştırma sağladığı belirlenmiştir. Özellikle alt yüzeye yakın katmanlarda Alüminyumun hafif yapısı sayesinde daha düşük ısıl direnç gözlemlenirken, Bakırın bulunduğu üst katmanlarda yüksek ısıl iletkenlik sayesinde ısı kaynağından gelen enerjinin daha verimli şekilde uzaklaştırıldığı görülmüştür.

Isı transfer katsayısı hesaplamaları ve sıcaklık dağılım analizleri, FDM yapının ısıl performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Katman geçişlerinde gözlemlenen düzgün sıcaklık eğrileri, yapının termal stabilitesini artırırken aynı zamanda sıcak noktaların oluşumunu da önlemiştir. Bu da, özellikle yüksek sıcaklık farklarının bulunduğu ortamlarda sistemin daha güvenilir çalışmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca termal gerilmelerin modellenmesi sonucunda, derecelendirilmiş yapının, ani sıcaklık değişimlerinde oluşabilecek yapısal deformasyonları önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, fonksiyonel derecelendirme sayesinde hem malzeme performansı hem de ısı transfer verimliliği aynı anda optimize edilmiş ve bu yaklaşımın, yüksek verim gerektiren elektronik soğutma sistemleri ve enerji dönüşüm teknolojileri gibi alanlarda önemli bir uygulama potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir.

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel kanatçıkların üretim süreçleri ile bu yapıların ısıl performanslarının değerlendirilmesini amaçlayan kapsamlı bir araştırmadır. Araştırmanın temel hedefi, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş dairesel kanatçıkların, tamamen homojen alüminyumdan üretilen kanatçıklara kıyasla sunduğu ısı transferi avantajlarını ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, çalışmada geometrik parametrelerden ziyade, malzeme yapısındaki kademeli değişimin ısı iletimi üzerindeki etkileri detaylı şekilde ele alınmıştır.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda, fonksiyonel derecelendirilmiş kanatçıkların farklı çaplarda ve profillerde tasarlanarak, hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle daha ayrıntılı bir performans analizi gerçekleştirilebilir. Özellikle farklı kompozisyonel dağılımlara sahip (örneğin değişen m dereceleriyle) dairesel kanatçık varyasyonlarının üretilmesi ve bu yapıların ısıl davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesi, konuya dair daha derin teknik bilgiler

edinilmesini sağlayacaktır. Bu tür çalışmalar, fonksiyonel derecelendirme yaklaşımının ısı transferi uygulamalarında taşıdığı potansiyeli daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır.

Mevcut çalışmada, FDM kanatçıkların üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Ancak gelecekte, eklemeli imalat (additive manufacturing) gibi modern üretim teknolojilerinin de bu tür yapılar için uygun alternatifler sunduğu düşünülmektedir. Eklemeli imalat teknikleri, üretim süreçlerinde daha fazla tasarım esnekliği sağlarken, aynı zamanda farklı malzeme geçişlerinin ve karmaşık yapısal konfigürasyonların elde edilmesine olanak tanır. Bu sayede üretim yöntemi ile ısıl performans arasındaki ilişki daha ayrıntılı olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel kanatçıkların ısı iletim performanslarının artırılması ve optimize edilmesi, hem malzeme mühendisliği hem de uygulamalı termal sistem tasarımı açısından önemli bir araştırma alanı olarak dikkat çekmektedir. Bu doğrultuda sürdürülecek ileri düzey çalışmalar, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin daha geniş uygulama alanlarına entegre edilmesini sağlayacak ve mühendislik çözümlerinin etkinliğini artıracaktır.

KAYNAKÇA

Arslan, K., & Gunes, R. (2023). Experimental analysis on deformation and damage behavior of Al6061/SiC functionally graded plates under low-velocity impact. *Ceramics International*, *49*(19), 31012-31023.

Aziz, A., & Rahman, M. (2009). Thermal Performance of a functionally graded radial fin. *International Journal of Thermophysics*, *30*(5), 1637-1648.

Aziz, A., Torabi, M., & Zhang, K. (2013). Convective–radiative radial fins with convective base heating and convective–radiative tip cooling: Homogeneous and functionally graded materials. *Energy Conversion and Management*, *74*, 366-376.

El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences*, *1*, 1-23.

Gaba, V., Tiwari, A., & Bhowmick, S. (2014). Thermal performance of functionally graded parabolic annular fins having constant weight. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *28*(10), 4309-4318.

Gayen, D., Tiwari, R., & Chakraborty, D. (2019). Static and dynamic analyses of cracked functionally graded structural components: A review. *Composites Part B: Engineering*, *173*, 106982.

Haghighi, M. (2016). Estimation of heat flux in variable thickness functionally graded annular fin. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction of Mechanical Engineering*, *40*(3), 203-214.

Hassanzadeh, R., & Pekel, H. (2016). Assessment of thermal performance of the functionally graded materials in annular fins. *Journal of Engineering Thermophysics*, *25*(3), 377-388.

Lee, H., Chang, W., Chen, W., & Yang, Y. (2012). Inverse heat transfer analysis of a functionally graded fin to estimate time-dependent base heat flux and temperature distributions. *Energy Conversion and Management*, *57*, 1-7.

Miyamoto, Y., Kaysser, W. A., Rabin, B. H., Kawasaki, A., & Ford, R. G. (Ed.). (1999). *Functionally Graded Materials* (C. 5). Springer US.

Ranjan, R., & Mallick, A. (2018). An efficient unified approach for performance analysis of functionally graded annular fin with multiple variable parameters. *Thermal Engineering*, *65*(9), 614-626.

Rao, S., Samant, P., Kadampatta, A., & Shenoy, R. (2013). An overview of Taguchi method: Evolution, concept and interdisciplinary applications. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *4*(10), 621-626.

Udupa, G., Rao, S. S., & Gangadharan, K. (2014). Functionally graded composite materials: An overview. *Procedia Materials Science*, *5*, 1291-1299.

Yıldırım, A., Eker, M., Yarımpabuç, D., & Celebi, K. (2021). Thermal wave propagation in a functionally graded annular fin with fixed base. *Waves in Random and Complex Media*, 1-16.

Yontar, O., Aydin, K., & Keles, I. (2020). Practical jointed approach to thermal performance of functionally graded material annular fin. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, *34*(1), 144-149.

MKE INC. FUZE/AMMUNITION STATIC EXPLOSION TEST INFRASTRUCTURE

Denizhan DEMİR,

[1]Makine ve Kimya Endüstrisi Inc, R&D and Technology Directorate, Fuze Systems Design Division, Emniyet Mahallesi Dögol Cad. No: 2 Anadolu Meydanı 06560 Yenimahalle-ANKARA/TÜRKİYE
serhad.yildiz@mke.gov.tr (Corresponding Author), +903122961627

Atakan BEKTAŞ, Göksel KARA, Faruk ULAMIŞ, Serhad YILDIZ

Abstract

In order to prevent any malfunctions or accidents that may occur in the static detonation tests of mechanical and electromechanical fuses, it is of big importance that the test team moves to a safe distance to be determined and detonates the fuse in a controlled manner and the ammunition in an integrated manner. In this context, a system consisting of three stations has been developed. These stations consist of Ground Control Station, Relay Station and Firing Station. The Firing Station is placed in the blast zone in a way that it will not be damaged. Afterwards, electrical connections are made with the plug to be detonated. However, in the event that there is a structure or a fence between the Firing and Ground Control Stations that will prevent wireless connection, a Relay Station is established to ensure the exchange of information between these two stations. The Ground Control Station becomes active after the other stations are in place and gives the detonation order. By installing such a system, fuse and ammunition tests will be carried out at a safe distance (anywhere between 0-10 km). In order to activate the Firing Station, the station must be powered close to the explosive. However, in order to prevent any errors, every step made in the station will be instantly controlled by the user and the power requirement to the firing card will be fulfilled in a protected manner. In addition, the Ground Control Station will have 2 safety commands, software and mechanical. These safety commands are integrated into 2 protected toggle switches on the station. Unless the safety commands are deactivated, no explosion will occur even if the user activates the firing button, and error and warning messages will appear on the LCD screen on the station. In this study, the Static Explosion Test Infrastructure to be established in MKE Joint Stock Company infrastructure will be mentioned in order to prevent electrical or mechanical errors with the interface software and hardware and to minimize the injuries or loss of life that may occur.

Keywords: Fuse, Security, Static Explosion, Ammunition, Remote communication

Introduction

The purpose of this system is to establish a remotely controlled detonation system for operational and training munitions used or produced by MKE. Even in the presence of natural cover, the detonation system will have the capability to neutralize the designated munition or fuze at distances of up to 10 km. The Test System consists of three subsystems: the Ground Control Station, which manages the detonation and issues the necessary commands with user assistance; the Relay Station, which prevents data loss that may occur due to natural or artificial obstacles; and finally, the Target System, which is employed to neutralize the munition/fuze.

The design and requirements of the systems are determined in accordance with NATO Standard AOP-67. In line with this standard, the system incorporates communication and security/encryption protocols, the required security layers, and the necessary electronic and mechanical tests to ensure that no life-threatening conditions arise in the event of any malfunction. By fulfilling these requirements and enabling communication among the three subsystems, the planned remotely controlled detonation system will be completed.

Materials and Methods

The Remote-Controlled Detonation System consists of three subsystems:

1. Ground Control Station
2. Relay Station
3. Munition Station



Figure 1: Remote-Controlled Detonation System



Figure 2: Ground Control Station and Relay Station

Ground Control Station

The Ground Control Station contains the necessary buttons and switches to enable or disable the required safety commands under user control and to execute the detonation of the munition. In addition, the Ground Control Station is equipped with an LCD screen that displays the status of the munition based on incoming and outgoing data, as well as whether the required safety commands have been transmitted to the Munition Station.

There are two safety commands. These safety commands activate the necessary mechanical and electronic safety mechanisms within the Munition Station, thereby preparing the munition for detonation. However, specific conditions must be met for each safety command to be activated before proceeding to the next. If these conditions are not satisfied, error messages will be displayed on the screen to the user.

Conditions regarding the Firing System:

- **Safety Command-1 (SC-1):** This command can only be activated once, and a corresponding message can be sent to the munition side. If repeated attempts are made to activate it, the system will generate an error. In order to restart the system, the Reset button must be used.
- Once **SC-1** has been activated, **Safety Command-2 (SC-2)** must be activated within 20 seconds. If not, the system will not permit continuation, and an error message will appear on the screen. Upon receiving this error message, the user must reset the system and reinitiate the safety commands from the beginning.
- Following the activation of **SC-2**, the firing sequence must be initiated within 10 seconds. If not, the system will not permit continuation, and an error message will be displayed on the screen. Upon receiving this error message, the user must reset the system and reinitiate the safety commands from the beginning.
- If the Ground Control Station does not receive status information messages from the Munition Station for 60 seconds, it will deactivate the system and will not allow the safety commands to remain active until a response to the status message is received.
- If the safety commands and the firing command are not transmitted sequentially as SC-1 → SC-2 → FIRE to the Munition Station, the system will display an error message on the screen and indicate the correct sequence to the user.

Relay Station

The Relay Station functions within the system as an intermediary, transmitting signals exchanged between the Ground Control Station and the Munition Station. When natural or artificial obstacles are present, it can be positioned on top of the required cover. It is designed to be very compact, and its battery can last for approximately 120 hours under full operational conditions.

The Relay Station constitutes the master structure of the RF communication. Communication between the other two stations cannot be established unless it is active. This structure can be considered a precautionary measure against corrupted message formats between the Ground Control Station and the Munition Station or against unauthorized communication attempts.

Munition Station

The Munition Station is the subsystem integrated with the munition within the main system and is responsible for ensuring its neutralization. To prevent damage during detonation, the system has been designed with a minimal structure. For warheads with a small blast radius, it can be placed behind a rock or an obstacle. In cases of large warheads, it can be buried slightly underground. For communication, it is sufficient to extend its antennas upward through an RF cable.

Inside the station, relay systems are present that are activated by the safety commands transmitted from the Ground Control Station. Once the necessary conditions are met and the safety commands are activated, the relays direct the flow of energy within the system. When the firing signal is sent, the energy is transmitted to the munition, resulting in its neutralization. The connection with the munition is designed to be wired. Depending on the fuze used on the munition, the activation method of the system varies, and accordingly, the power requirements within the system also differ.

The munition neutralization process is carried out as follows:

- The user activates the station and verifies the status of the relays directing the power flow through the LEDs located on the station.
- If no issues are detected in the operation of the station, it is placed in a safe area where it will not be damaged, and the connection with the munition is established.
- After the connection is made, the Relay Station is activated, establishing communication between the Ground Control Station and the Munition Station. To confirm communication, the Munition Station sends an “ACIT” message to the Ground Control Station.
- Once the system is ready, the Munition Station awaits the SC-1 and SC-2 safety commands from the Ground Control Station.
- Upon receiving the safety commands, the system becomes ready for firing and awaits the firing signal.
- When the firing signal is received, it initiates the fuze and neutralizes the munition.
- Following the munition neutralization, the Relay Station is deactivated, and communication is terminated.
- After communication is disconnected, the system resets itself, as the safety commands and firing sequence have already been executed, and it becomes ready to await a new mission.

Findings and Discussion

Since the system design and integration have undergone several revisions, the testing phase has not yet been initiated. The tests conducted so far are as follows:

Distance Test: In order to evaluate how much natural or artificial obstacles affect RF communication within the system, an artificial barrier was placed between two stations, and the data loss rate was measured. A success rate of 98% was achieved. The thickness and length of the barrier in the enclosed area were increased, and the results were recorded. When data loss between the stations was eliminated, the Relay Station was activated, thereby removing the data loss caused by the barrier.

Planned future tests include the following:

MIL-STD-461G: Electromagnetic Compatibility (EMC)
Critical tests:

- CE101/CE102: Emissions conducted through power lines
- RE101/RE102: Radiated electromagnetic emissions
- CS101/CS114/CS115/CS116: Immunity to conducted EMI on power lines
- RS101/RS103: Radiated susceptibility – immunity to external EMI

MIL-STD-810H: Environmental Engineering Considerations
Critical tests:

- Method 501.7 & 502.7 – High & Low Temperature: Tests system operability within temperature ranges (e.g., -40°C to +70°C).
- Method 503.7 – Temperature Shock: Evaluates whether the system is damaged by sudden temperature changes.
- Method 507.6 – Humidity: Performance under high humidity conditions.
- Method 514.8 – Vibration: Verifies whether physical connections degrade under vibration.
- Method 516.8 – Shock: System response under shock and impact conditions.
- Method 500.7 – Low Pressure (Altitude): Operability at high altitudes.

MIL-STD-331: Fuze and Explosive Systems
Critical tests:

- Misfire / Duds Test: Detection of non-responsive systems.
- Functioning Test: Verification of correct firing sequence operation.
- Resistance to Premature Arming: Determines whether the system activates accidentally (e.g., due to EMP, vibration).
- Environmental Test Interface: Conducted in parallel with MIL-STD-810H tests.
- Reset & Fail-Safe Validation: Verification of system response to error conditions such as timeouts or countdown failures.

MIL-STD-498: Software Development and Documentation
Critical tests:

- Software Requirements Specification (SRS): Functional and performance requirements.
- Interface Requirements Specification (IRS): Definitions of external and internal interfaces.
- Software Design Description (SDD): Software architecture, modules, and data structures.
- Software Test Description (STD): Unit test and integration test scenarios.
- Software Test Report (STR): Reports of actual test results.
- Software Version Description (SVD): Documentation of the compiled version (HEX, MAP, etc.).

Conclusion and Recommendations

Following the completion of environmental and software tests, the first open-field detonation tests will be conducted. If these tests are successful, the initial static detonation trials will commence using small-sized munitions for neutralization. Upon successful completion of these neutralization tests, the first prototype test system will be realized.

The system has demonstrated satisfactory performance in terms of functional safety, sequential command verification, and communication integrity. It operates in accordance with the SC-1 → SC-2 → FIRE sequence, ensuring a secure firing process through timer-supported safety checks and control mechanisms. However, to validate the system under real environmental conditions, it is recommended to conduct environmental tests (temperature, vibration, humidity, etc.) in accordance with **MIL-STD-810H**, ignition chain and safety tests in line with **MIL-STD-331**, as well as software verification processes in compliance with **MIL-STD-498**. To further enhance system safety against unexpected activations, additional fail-safe measures—such as PWM-based signal verification or periodic signal generation—may be integrated. The current structure provides a secure foundation suitable for mass production and field deployment, and the proposed tests will ensure the completion of the full validation process.

In addition, during the development phase of the prototype (Revision 1), a graphical user interface (GUI) will be introduced to provide the user with information regarding the type and weight of the munition. With this new feature, the system will internally calculate the effective blast radius of the munition and determine the corresponding safe distance. Unless this safe distance is established, the system will not permit the transmission of safety commands from the Ground Control Station.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the contributions and support of MKE Inc. Ammunition Factory in facilitating these tests.

References

- **AOP-67** – Allied Ordnance Publication: Guidance on the assessment of safety and suitability for service of munitions.
- **STANAG 4187** – NATO Standardization Agreement: Firing Tables for Artillery and Mortars.
- **MIL-STD-331** – Environmental and Performance Tests for Fuzes.
- **MIL-STD-498** – Software Development and Documentation Standard.
- **MIL-STD-810** – Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests.
- **MIL-STD-461** – Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment.
- **STANAG 4623** – Safety Design Requirements for Munition-Handling Equipment.
- **MIL-STD-882E** – System Safety Program Requirements.
- **STANAG 4310** – NATO Standard for Qualification of Explosive Materials for Military Use.

MKE INC. FUZE DESIGN AND PRODUCTION CAPABILITIES: 40 MM GRENADE LAUNCHER AMMUNITION FUZE SYSTEMS

Melike KAYA, Selim GEMİCİ

Makine and Chemical Industry Inc., Directorate of R&D and Technology, Systems Engineering Department, Emniyet Mahallesi Dögol Cad. No: 2 Anadolu Meydanı 06560 Yenimahalle-Ankara-Türkiye

Atakan BEKTAŞ, Denizhan DEMİR, Göksel KARA, Faruk ULAMIŞ, Serhad YILDIZ

Makine and Chemical Industry Inc., Directorate of R&D and Technology, Department of Fuze Systems Research Center, Emniyet Mahallesi Dögol Cad. No: 2 Anadolu Meydanı 06560 Yenimahalle-Ankara-Türkiye

serhad.yildiz@mke.gov.tr (Corresponding Author), +903122961627

Abstract

This study will provide a general review and assessment of fuze systems, which are mechanisms designed to ensure the safety of ammunition from the moment it is handled until detonation. Such systems may incorporate electronic, mechanical, and chemical sub-components and, most importantly, determine the conditions under which the ammunition will function. As an example, the 40 mm Grenade Launcher Ammunition Fuze will be examined. Within this scope, the study will discuss the working mechanism and technical specifications of the 40 mm ammunition fuze developed by MKE Inc. This fuze enables reliable detonation through its self-destruct feature, is activated by inertia and centrifugal force, and employs a self-destruct mechanism to ensure operation in cases where it fails to function upon impact with the target.

Keywords: ammunition, safety and arming mechanism, explosive.

Introduction

Within the framework of rapidly advancing technological paradigms, weapon systems and military technologies are undergoing continuous evolution and transformation. The convergence of advancements in materials science, the development of software-based systems, and research on chemical explosives has paved the way for significant progress in weapon systems. These collective efforts are strategically aimed at maximizing system safety while simultaneously enhancing effectiveness and reliability (EDM, 2021). In this context, safety mechanisms are implemented in mechanical, electronic, or hybrid forms (Taylor, 2011).

The primary functions of these systems, known as fuzes, can be summarized as follows:

- Ensuring that the munition remains safe throughout its entire life cycle,
- Preventing detonation until the munition has traveled a specific distance after leaving the weapon system, thereby safeguarding personnel and equipment,
- Enabling the munition to function only under the desired scenarios and conditions.

In parallel with the evolving global concept of warfare, a new paradigm has emerged that emphasizes counter-terrorism and area defense, bringing urban operations to the forefront. A critical munition employed in such operations is the 40 mm grenade launcher round (Garber, 2014). The entry of military personnel into an operational area after munitions have been fired makes it imperative that no unexploded ordnance remains.

The presence of unexploded munitions in an operational area can result in several adverse consequences, including:

- Weakened operational effectiveness and reduced combat power,
- Failure to neutralize enemy combatants,
- Risk of unexploded ordnance being booby-trapped and reused by opposing forces,
- Potential long-term harm to civilians,
- Increased time and costs associated with post-operation clearance.

In this context, self-destructing 40 mm grenade launcher ammunition has become highly sought after by armed forces worldwide. The ability of such ammunition to self-destruct if it fails to detonate upon firing is of critical importance both for the safety of military personnel and for range clearance. An examination of defense industry inventories further reveals a clear trend toward the adoption of 40 mm self-destructing fuzes.

Materials and Methods

MKE Inc. is continuing the development of an electronic self-destruct fuze system that complies with STANAG 4187 and MIL-STD-1316 military standards. This fuze is specifically designed for use in 40 mm grenade launcher ammunition (Terhune, 2017). The development process involves the in-house production of all components comprising the fuze.

At each stage of the project, the components are meticulously inspected to ensure conformity with their respective technical drawings. Once verified, the fuze system is integrated into two main assemblies: the upper body and the lower body. Due to confidentiality requirements, detailed information regarding the lower body assembly, which contains the safety and arming mechanism, cannot be disclosed. The fuze is currently undergoing both live-fire and laboratory-based ammunition testing.

Findings and Discussion

The most recent firing tests were conducted in May using MKE MOD 78 grenade launcher ammunition filled with Comp-B (as well as inert rounds) and equipped with a live electronic fuze module. The fuze's explosive chain, shown in Table 1, consists of an electric initiator, a detonator, and a PETN/Tetryl booster. The tests were carried out with a 40 mm automatic grenade launcher against Kevlar fabric (Figure 1) and against the ground at a distance of 65 m.

Following each shot, the condition of the projectile—recovered after being stopped by the fabric—was examined on-site. Observations revealed that the electronic module in some fuzes functioned as intended, while in others, the expected function did not occur due to damage to the PCB. As a result, it has been planned to repeat the firing tests in September, with the

insulating and anti-vibration chemical used for PCB protection being replaced to improve durability.



Figure 1 (a) 40 mm ammunition and (b) Kevlar fabric used in test day at May 2025.

Table 2 Technical Specifications of High Velocity Self-Destruct fuze for 40 mm grenade ammunition.

Fuze Function	Point Detonation and Self Destruction
Booster	Tetryl
Max. Range	2000 m
Muzzle velocity	250 m/sn
Operational Temperature	-40 °C to +63 °C
Storage Temperature	-54 °C to +71 °C
Shelf Life	10 Years
Overall expected functional Reliability	≥ 99 %
Compliant Ammunition Standards	STANAG 4157; STANAG 4187; MIL-STD-331; MIL-STD-1316; AOP-4157

Conclusion and Recommendations

The design verification tests are scheduled to be conducted in September using 15 live fuzes. The firing test activity will be deemed successful if the following conditions are met:

- A reliability rate of 99% is achieved, as indicated in Table 1,
- No fractures or cracks are observed on the PCB.

Upon completion of the firing tests, environmental tests will be carried out on the fuze. These will be selected from the MIL-STD-331 standard, with the most appropriate test methods applied to this fuze.

Following the conclusion of the design verification phase, the objective is to complete qualification activities and transition to mass production.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the contributions and support of MKE Inc. Ammunition Factory in facilitating these tests.

References

European Defence Matters. (2021). Pushing limits Defence Innovation in a high-tech world, Accessed on 11 August 2025, available online at: https://eda.europa.eu/docs/default-source/eda-magazine/edm22singleweb.pdf.

Garber K. (2014). Self-destruction mechanism for a fuze, Patent No: WO2014106565A1.

Taylor N. C. (2011). Mechanical safe-and-arm device for a fuze, Patent No: EP 2 287 558 A2.

Terhune J. (2017), PEO Ammunition, Accessed on 11 August 2025, available online at: https://www.army.mil/article/194405/next_generation_of_40_mm.

SEÇICI LAZER ERGITME YÖNTEMIYLE ÜRETILEN SS316L'YE UYGULANAN ISIL İŞLEMIN ETKISI

Nazife Nur Cengiz[1, a *], Sachin Salunkhe[2, b] and Gökhan Küçüktürk[3, c]

[1]Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey

[2]Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey

[3]Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey

[a] nnur.cengiz@gazi.edu.tr, [b] sachinsalunkhe@gazi.edu.tr, [c] gkucukturk@gazi.edu.tr

Keywords: Additive Manufacturing; Selective Laser Melting (SLM); 316L SS; Heat Treatment

Abstract. This research systematically examines the microstructural evolution and mechanical property alterations in 316L austenitic stainless steel fabricated by Selective Laser Melting (SLM) following post-process heat treatment. As a material of critical importance in high-tech industries including aerospace, automotive, and biomedical applications, 316L alloy owes its widespread adoption to its remarkable combination of mechanical strength, exceptional ductility, and superior corrosion resistance.

While SLM technology offers significant advantages for manufacturing complex geometries, the performance characteristics of fabricated components can be substantially enhanced through appropriate post-processing techniques. Among these, heat treatment plays a pivotal role in determining the final microstructural configuration and mechanical behaviour of the material. Existing literature indicates that elevated heat treatment temperatures lead to decreased microhardness values, grain coarsening, and reduced mechanical strength in 316L alloy. However, certain studies have reported notable improvements in both tensile strength and elongation following thermal processing. Additionally, SLM- produced specimens have demonstrated enhanced energy absorption capacity in Charpy impact tests. Although heat treatment generally improves corrosion resistance, hot isostatic pressing (HIP) has been associated with decreased tensile strength alongside increased deformation capability.

In the present investigation, SLM-fabricated 316L stainless steel specimens underwent heat treatment at 400˚C, 650˚C, 950 ˚C, and 1150 ˚C for two-hour durations, followed by rapid water quenching. The influence of varying temperature parameters on microstructural characteristics, including grain morphology and porosity, and mechanical performance was comprehensively analysed. Our findings demonstrate that optimized heat treatment parameters can significantly enhance critical properties of SLM- produced 316L stainless steel, including hardness, ductility, wear resistance, and corrosion performance. These results provide important insight for improving the reliability and performance of SLM technology, particularly for manufacturing geometrically complex components in aerospace and automative applications. This study is anticipated to contribute to the development of industrial heat treatment optimization strategies for SLM processes.

Introduction. Modern manufacturing has witnessed a paradigm shift with the emergence of additive manufacturing (AM) technologies, transitioning from prototyping applications to

functional part production. Unlike conventional subtractive methods, AM builds components vertically through sequential material deposition and controlled energy application [1]. Among laser-based AM (LBAM) techniques for metal, two principal categories exist: powder bed fusion (PBF-L) methods including SLM [2] and directed energy deposition (DED) approaches such as Direct Laser Deposition (DLD) [3] and Laser Engineered Net Shaping (LENS). SLM has emerged as a particularly promising AM technique due to its design flexibility, material efficiency, and production speed advantages. This technology's capability to manufacture intricate, topology- optimized geometries as monolithic components using diverse raw materials has driven its adoption across biomedical, aerospace, automative, marine, and space applications. The process utilizes a higher-power laser to selectively fuse powdered material in successive layers.

This investigation employs ss316L powder due to its exceptional mechanical properties, an optimal balance of strength and ductility coupled with remarkable corrosion resistance, making it ideal for demanding aerospace and automative applications. Research into SLM parameter optimization has revealed significant relationships between processing conditions (laser power density, scanning velocity, hatch spacing, and build orientation) and resultant material characteristics. Chery at al. [4] demonstrated laser power density's influence on SLM-produced 316L's hardness and porosity characteristics. Livani's team [5] systematically optimized scanning parameters to enhance mechanical performance while minimizing defects. Li et al. [6] examined build orientation effects on tribological properties through dry sliding wear tests, revealing anisotropic behaviour. Sun at al. [7] correlated minimized porosity with maximized wear and corrosion resistance, noting substantial mechanical improvement over conventional manufacturing.

Microstructural investigation of SLM produced components reveal unique solidification patterns. Melt pool boundaries exhibit epitaxial growth from partially melted grains, with solidification dynamics governed by heat flux, thermal gradients, and crystallographic growth directions [9,10]. The rapid cooling rates (10^3-10^8 K/s) characteristic of SLM promote submicron cellular dendritic structures aligned with thermal gradient [11,12], resulting in directionally dependent microstructural and mechanical anisotropy [13,14].

Post processing heat treatments significantly alter SLM 316L's properties. Kamariah's et al. [16] observed δ-ferrite phase reduction and corresponding hardness decrease at elevated temperatures. Salman's et al. [17] reported strength reduction and cellular structure coarsening with increasing treatment temperatures. Sistiage et al. [18] noted improved impact energy at 950˚C while maintaining tensile strength. Kong et al. [19] demonstrated enhanced corrosion resistance following recrystallization treatments, while Röttger et al. [20] documented HIP-induced ductility improvements despite strength reductions. Bedmar et al. [21] revealed temperature dependent corrosion mechanisms transitions, with high-temperature treatments reducing polarization resistance.

The unique microstructural features of AM metals, including residual stress, internal defects, and ultrafine precipitates (<1 μm), necessitate distinct heat treatment approaches compared to conventional processed materials. Recent studies highlight critical phenomena:

- δ-ferrite phase composition (Cr, Si, Mn, O) significantly influences corrosion behaviour [22].
- Subcritical treatment 950°C optimally preserves cellular substructures while eliminating melt pool boundaries [23].
- Oxide content and passive film thickness govern post- treatment corrosion performance [19].
- 950°C treatments efficiently mitigate residual stress and stress corrosion cracking susceptibility [24].
- Microstructural evolution during subcritical treatments requires further systematic investigation [25].

Advanced characterization reveals additional insights:

- Si-O-Mn silicate fractions vary with treatment temperature, affecting mechanical properties [26].
- δ-ferrite formation relates to Mo dissolution and Cr equivalency [27].
- Density remains unaffected by thermal processing [28].
- Annealing suppresses intergranular fracture but challenges strength- ductility balance [29].
- Grain growth control is paramount for optimal mechanical performance [30].

Methods.

Powder Characteristics. In this study, commercially available steel powders were utilized in the laser metal powder melting process. The material selection was guided by the objective of performing experimental analyses on components commonly found in aerospace systems, where enhanced performance under demanding conditions is essential. These steels were selected due to their favourable mechanical and operational characteristics. Among the materials frequently used in SLM applications, stainless steel and maraging steel stand out because of their low susceptibility to chemical degradation and ease of commercial production. For the experimental work, AISI 316L powder, manufactured through gas atomization and provided by Renishaw, was chosen. This specific alloy is a non-magnetic, austenitic stainless steel characterized by its low carbon content and alloying elements such as chromium, nickel, and molybdenum, along with trace amounts of other elements. The full chemical composition of the powder material is detailed in Table1.

Table 1.Chemical composition of the virgin powder of 316L. All elements are in [wt %].

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
Balance	**18**	**14**	**3**	**< 2**	**< 1**	**< 0.1**	**< 0.1**	**<0.045**	**<0.03**	**<0.03**

Settings and Samples Fabrication. The experimental samples were produced by employing the parameters listed in Table 4, which were determined as the optimal settings for the SLM method. The SLM technique, chosen to align with the scope and aims for this research, is extensively applied in modern aerospace and biomedical applications. As a subtype of the power bed fusion additive manufacturing technologies, SLM involves layer-by-layer melting of powdered material using a laser source to construct the final component. In terms of its operational mechanism, the process starts with a recoater that evenly distributes a thin layer of metal powder onto the build platform. A laser beam, guided by scanning mirrors, selectively melts the powder to generate the desired geometry of each cross section. After completing a layer, the build platform lowers by the defined layer thickness, and the cycle continues until the complete geometry is fabricated. Through specialized software, the 3D model is prepared by conducting steps such as orientation adjustment on the build platform, generation of necessary support structures, slicing into individual layers, and assigning appropriate process parameters.



Figure 2.Samples after produced by SLM

Tensile test specimens based on ASTM E8 standards and Charpy impact specimens based on ASTM E23 standards were produced using the SLM Renishaw AM500 3D printer available in the inventory of the PROTOLAB laboratory at the Technical University of Ostrava, Czech Republic. The optimal SLM printing parameters were applied, as shown in Table 2. As-built samples were obtained using the meander printing strategy. The production and heat treatment processes were carried out utilizing the infrastructure of the PROTOLAB laboratory. Since the focus of this study is not on printing parameters but on determining the optimal values for heat treatment parameters, the printing parameters and strategy were kept constant for the tensile and impact test specimens.

Heat Treatment. Post-processing techniques are extensively utilized in studies that aim to improve the mechanical properties of components fabricated using AM technologies. Among these methods, heat treatment stands out as a widely adopted approach due to its effectiveness in enhancing both mechanical performance and microstructural features. The main objectives of heat treatment include relieving residual stress, refining the grain structure, improving microstructural homogeneity, and reducing porosity ultimately contributing to increased fatigue life, wear resistance, and corrosion performance.

Table 2.Fabrication Conditions for an SLM 3D printer

Parameter	Value
The power of lasers	200 W
The strategy of printing	Meader
Hatch Spacing	0.11 mm
Preheating Temperature	Ambient
The speed of Scanning	650 mm/s
Layer Thickness	50 µm

A critical aspect of heat treatment is the selection of the furnace atmosphere, which entails deciding whether the process will occur in air, under vacuum, or within an inert gas environment. This choice depends heavily on chemical characteristics of the material and its susceptibility to oxidation. For oxidation sensitive materials, inert atmospheres such as argon or nitrogen are typically favoured over ambient air. In this study, atmospheric conditions were selected based on the use of ss316L. However, when corrosion resistance is a primary goal, heat treatments are often conducted under reducing environments, such as hydrogen atmospheres or vacuum conditions. For most metal alloys produced via AM, protective gas environments are recommended, with aluminium alloys being a notable exception.

Heat treatment significantly affects the surface characteristics of materials, as microstructural transformation lead to changes in surface morphology. Empirical evidence indicates that surface roughness can vary post treatment [31], which in turn influences mechanical properties such as corrosion resistance, fatigue strength, and wear behaviour.

Stress relief heat treatment has been observed to increase material ductility; however, when performed at excessively high temperatures, it may adversely impact both fatigue performance and tensile strength. Therefore, accurately assessing the level of residual stress before the application of stress relief treatments it vital for selecting the appropriate temperature [32]. In this context, a heat treatment at 650 ˚C was selected for ss316L produced via SLM, as literature suggests that while significant changes to the microstructure are not expected at this temperature, a notable reduction or even elimination of residual stress may occur. This assumption was investigated experimentally in the present study.

Prior studies have reported that higher heat treatment temperatures lead to reductions in both hardness and internal porosity levels [33], primarily due to grain structure homogenization. Annealing also contributed to improved corrosion resistance by modifying the key mechanical attributes such as hardness and wear behaviour, as well as by altering the oxide layer formed on surface [34]. Typically, parts produced through AM techniques exhibit inferior corrosion resistance compared to conventionally manufactured components. However, subjecting AM parts to appropriate annealing protocols has been shown to significantly enhance their corrosion resistance. In fact, with properly selected parameters, the corrosion resistance of AM parts may even exceed that of traditionally manufactured equivalents. Experimental investigations have particularly focused on the temperature range of 950-1150˚C, which has been identified as critical for maximizing corrosion resistance.



Figure 3. During heat treatment process

In this study, samples intended for tensile and Charpy impact testing were heat treated at four different target temperatures (400˚C, 650 ˚C, 950˚C, and 1150˚C) for a duration of 2 hours. Following the heat treatment, samples were rapidly quenched in water. The resulting microstructural and mechanical property changes due to both the selected temperature levels and the quenching process were examined through various characterization techniques.

Table 3. Experimental setup and heat treatment cycle.

Sample	Type of specimen	Heat treatment cycle
HT-0 (As-built)	Tensile Testing Specimen	-
HT-1	Tensile Testing Specimen	400˚C for 2 hours, water cooling
HT-2	Tensile Testing Specimen	650˚C for 2 hours, water cooling
HT-3	Tensile Testing Specimen	950˚C for 2 hours, water cooling
HT-4	Tensile Testing Specimen	1150˚C for 2 hours, water cooling
HT-5	Charpy Impact Testing Specimen	400˚C for 2 hours, water cooling
HT-6	Charpy Impact Testing Specimen	650˚C for 2 hours, water cooling
HT-7	Charpy Impact Testing Specimen	950˚C for 2 hours, water cooling
HT-8	Charpy Impact Testing Specimen	1150˚C for 2 hours, water cooling

Results

Mechanical Properties. To assess the mechanical performance, tensile test results of as-built samples produced via SLM, without any heat treatment, were compared with those of samples subjected to identical cooling conditions (water quenching) following heat treatments at various temperatures for a consistent duration. While an overall increase in yield strength was noted with heat treatment, the enhancement was particularly evident between 400˚C and 650˚C. However, beyond 650˚C, a decline in yield strength became apparent. Despite these changes, a notable disparity in yield strength remains when compared to the as-built specimens.

Analysing the YS/UTS ratio, a key indicator of ductility, the results revealed that optimal ductility occurred at 650˚C, in agreement with trends previously reported in the literature. Furthermore, samples treated at 950˚C demonstrated tensile behaviour similar to that of the as-built condition. This outcome suggests underlying microstructural factors, which will be explored in detail through further microstructural characterization.

Table 4. Mechanical properties of samples

Sample Identify	**R_m**	**$A_{5,65}$**	**$R_{p0.2}$**	**YS/UTS ratio**	**Impact Energy**	**Toughness**
	MPa	%	MPa		J	J/cm^2
400˚C,2h, water cooling	612	13,02	420,3	0,68	37,67	47
650˚C,2h, water cooling	635,7068	11,7124	483,852	0,76	44	55
950˚C,2h, water cooling	625,6863	16,3364	359,22	0,574	46,67	58,34
1150˚C,2h, water cooling	517	25,8595	263,118	0,5089	50	62,34
As-Built	630,766575	20,5201	361,73665	0,57348	44,5	55,75

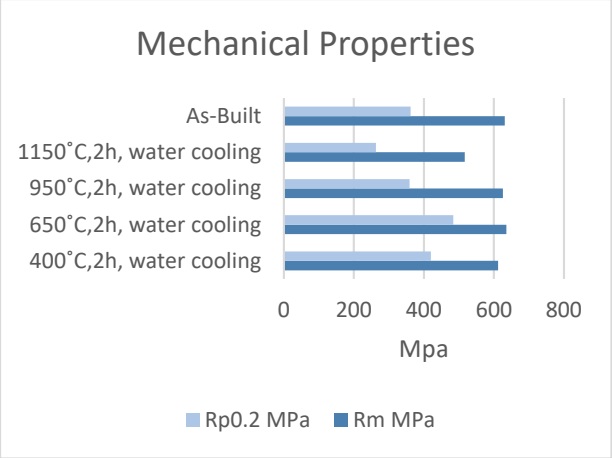


Figure 5. The light blue colour represents the yield strength, while the dark blue colour represents the ultimate tensile strength.

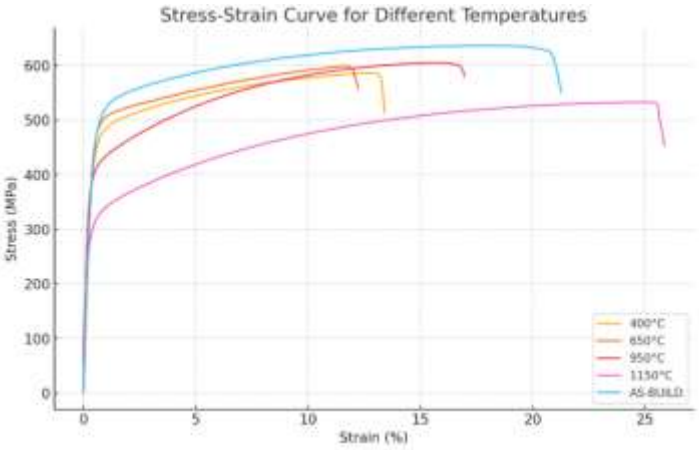


Figure 4. HT1 400°C; HT2 650°C; HT3 950°C; HT4 1150°C; HT5 as built

The Charpy impact test results indicate that the as-built specimen can absorb 44.5 J of energy, leading to the conclusion that heat treatment improves impact energy. Following the heat treatment at 650°C, an enhancement in impact energy was observed, with increases of 4.8% and 12.36% at 950°C and 1150°C, respectively, as the temperature rose. This improvement is believed to be influenced by the choice of water quenching as the cooling method. The detailed underlying mechanism can be elucidated after examining the fracture morphology.

Discussion

Contrary to several findings in existing literature, the existing literature, the mechanical properties observed at 650°C in this experimental study did not align with those of the as-built condition. Beyond the influence of temperature, this study also highlighted the role of the cooling method as a determining factor in shaping both mechanical performance and microstructural characteristics. A comparative evaluation of different cooling strategies demonstrates that water quenching at elevated temperatures yields superior mechanical results compared to atmospheric or furnace cooling techniques.

To gain a deeper understanding of these observations, the relationship between microstructural evolution and mechanical behaviour will be investigated through detailed microstructural analysis. Additionally, this work aims to offer a comprehensive contribution to the literature by examining the role of residual stress in mechanical performance, along with how specific experimental variables influence both residual stress development and microstructural transformation.

Conclusions

This study aims to identify the necessary parameters for extending the use of post-processing methods to optimize the properties of ss316L, a material extensively utilized in aerospace and defence sectors, following its fabrication through the SLM technique. Considering the critical

demands of these application areas such as superior strength- ductility synergy, resistance to corrosion, high- temperature performance, surface integrity, and appropriate hardness, this research experimentally explores the impact of selected heat treatment parameters. The mechanical property variations resulting from different heat treatment conditions are systematically presented.

In samples subjected to heat treatment at 400°C followed by water quenching, a 3% reduction in yield strength was observed, along with a 16% increase in ultimate tensile strength and a 6% enhancement in elongation, relative to the as-built specimens. However, when compared with existing literature, quenching at this temperature appears to adversely affect both yield strength and the general strength characteristics of the material. Moreover, due to the associated decline in toughness and energy absorption capacity, the mechanical behaviour does not fully align with desired performance standards.

Heat treatment at 650°C resulted in mechanical properties approaching those of the as-built state in terms of strength, while yielding notable gains in both ultimate tensile strength and ductility. This temperature condition provided a well-balanced strength- ductility combination. Additionally, yield strength showed improvement compared to the 400°C case. Charpy impact test outcomes also demonstrated toughness and absorbed energy levels that were consistent with the as-built condition.

At 950°C, yield strength exhibited a downward trend once more. Interestingly, the elongation and ductility values were found to be like those of the as-built samples, which contrasts with trends typically reported in the literature. The observed increases in toughness and absorbed energy at this temperature are attributed to microstructural phase transformations that occur during the heat treatment process.

References

[1] Aref Yadollahi, Nima Shamsaei, Scott M. Thompson, Denver W. Seely, Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel, Materials Science and Engineering: A,Volume 644,2015, Pages 171-183,

[2] Yuhong Xiong, William H. Hofmeister, Zhao Cheng, John E. Smugeresky, Enrique J. Lavernia, Julie M. Schoenung, In situ thermal imaging and three-dimensional finite element modeling of tungsten carbide–cobalt during laser deposition,Acta Materialia, Volume 57, Issue 18,2009,Pages 5419-5429,

[3] Y. Xue, A. Pascu, M.F. Horstemeyer, L. Wang, P.T. Wang, Microporosity effects on cyclic plasticity and fatigue of LENS™-processed steel,Acta Materialia,Volume 58, Issue 11, 2010,Pages 4029-4038,

[4] Cherry, J.A., Davies, H.M., Mehmood, S. et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. Int J Adv Manuf Technol 76, 869–879 (2015).

[5] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, A. Fortunato, Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, Volume 249, 2017, Pages 255-263,

[6] Hua Li, Maziar Ramezani, Ming Li, Chao Ma, Jyhwen Wang, Tribological performance of selective laser melted 316L stainless steel, Tribology International,Volume 128, 2018, Pages 121-129,

[7] Sun, Y., Moroz, A. & Alrbaey, K. Sliding Wear Characteristics and Corrosion Behaviour of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel. J. of Materi Eng and Perform 23, 518–526 (2014).

[8] I. Yadroitsev, I. Smurov, Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders, Physics Procedia, Volume 12, Part A, 2011, Pages 264-270,

[9] Donghua Dai, Dongdong Gu, Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments, Materials & Design, Volume 55, 2014, Pages 482-491,

[10] G. Casalino, S.L. Campanelli, N. Contuzzi, A.D. Ludovico, Experimental investigation and statistical optimisation of the se-lective laser melting process of a maraging steel, Optics & Laser Technology, Volume 65, 2015, Pages 151-158,

[11] Yuan Zhong, Leifeng Liu, Stefan Wikman, Daqing Cui, Zhijian Shen, Intragranular cellular segregation network structure strengthening 316L stainless steel prepared by selective laser melting, Journal of Nuclear Materials, Volume 470, 2016, Pages 170-178,

[12] E. Yasa, J-P. Kruth, Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting,Procedia Engineering, Volume 19, 2011, Pages 389-395

[13] A. Riemer, S. Leuders, M. Thöne, H.A. Richard, T. Tröster, T. Niendorf, On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting, Engineering Fracture Mechanics,Volume 120,2014, Pages 15-25,

[14] Spierings, A. B., Starr, T. L., & Wegener, K. (2013). Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. Rapid pro-totyping journal, 19(2), 88-94.

[15] Lei, Jingfa, Ge, Yongsheng, Liu, Tao, Wei, Zhan, Effects of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel, Shock and Vibration, 2021, 6547213, 12 pages, 2021.

[16] Kamariah, M. S. I. N., Harun, W. S. W., Khalil, N. Z., Ahmad, F., Ismail, M. H., & Sharif, S. (2017, October). Effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of selective laser melting 316L stainless steel. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 257, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.

[17] O.O. Salman, C. Gammer, A.K. Chaubey, J. Eckert, S. Scudino, Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 316L steel synthesized by selective laser melting, Materials Science and Engineering: A, Volume 748,2019, Pages 205-212,

[18] Montero-Sistiaga, Maria & Nardone, Steve & Hautfenne, Celine & Humbeeck, Jan. (2016). Effect of heat treatment of 316L stainless steel produced by Selective Laser Melting (SLM).

[19] Decheng Kong, Chaofang Dong, Xiaoqing Ni, Liang Zhang, Jizheng Yao, Cheng Man, Xuequn Cheng, Kui Xiao, Xiaogang Li, Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes, Journal of Materials Science & Technology, Volume 35, Issue 7, 2019, Pages 1499-1507

[20] Arne Röttger, Karina Geenen, Matthias Windmann, Florian Binner, Werner Theisen, Comparison of microstructure and mechanical properties of 316L austenitic steel processed by selective laser melting with hot-isostatic pressed and cast material, Materials Science and Engineering: A, Volume 678,2016, Pages 365-376.

[21] J. Bedmar, S. García-Rodríguez, M. Roldán, B. Torres, J. Rams,Effects of the heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of 316 L stainless steel manufactured by Laser Powder Bed Fusion, Corrosion Science, Volume 209.

[22] Qi Chao, Sebastian Thomas, Nick Birbilis, Pavel Cizek, Peter D. Hodgson, Daniel Fabijanic, The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel, Materials Science and Engineering: A,Volume 821.

[23] Zhou, L., Mehta, A., McWilliams, B., Cho, K., & Sohn, Y. (2019). Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused inconel 718 before and after heat treatment. Journal of Materials Science & Technology, 35(246), 1153-1164.

[24] E.D. Bruycker, M.L.M. Sistiaga, F. Thielemans, K. Vanmeensel Corrosion testing of a heat treated 316 L functional part produced by selective laser melting MSA, 08 (2017), pp. 223-233, 10.4236/msa.2017.83015.

[25] M. Laleh, E. Sadeghi, R.I. Revilla, Q. Chao, N. Haghdadi, A.E. Hughes, W. Xu, I. De Graeve, M. Qian, I. Gibson, M.Y. Tan Heat treatment for metal additive manufacturing.

[26] Nan Chen, Guoqiang Ma, Wanquan Zhu, Andrew Godfrey, Zhijian Shen, Guilin Wu, Xiaoxu Huang, Enhancement of an additive-manufactured austenitic stainless steel by post-manufacture heat-treatment, Materials Science and Engineering: A, Volume 759, 2019, Pages 65-69.

[27] K. Saeidi, X. Gao, F. Lofaj, L. Kvetková, Z.J. Shen, Transformation of austenite to duplex austenite-ferrite assembly in annealed stainless steel 316L consolidated by laser melting, Journal of Alloys and Compounds, Volume 633, 2015, Pages 463-469.

[28] Tascioglu, E., Karabulut, Y. & Kaynak, Y. Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol 107, 1947–1956 (2020).

[29] Tobias Ronneberg, Catrin M. Davies, Paul A. Hooper, Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment, Materials & Design, Volume 189, 2020.

[30] Leifeng Liu, Qingqing Ding, Yuan Zhong, Ji Zou, Jing Wu, Yu-Lung Chiu, Jixue Li, Ze Zhang, Qian Yu, Zhijian Shen, Dislocation network in additive manufactured steel breaks strength–ductility trade-off, Materials Today, Volume 21, Issue 4, 2018, Pages 354-361.

[31] Majeed, A., Ahmed, A., Salam, A., & Sheikh, M. Z. (2019). Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2(4), 288-295.

[32] Dutta, B., Babu, S., & Jared, B. H. (2019). Science, technology and applications of metals in additive manufacturing. Elsevier

[33] Zhou, L., Mehta, A., McWilliams, B., Cho, K., & Sohn, Y. (2019). Microstructure, precipitates and mechanical properties of powder bed fused inconel 718 before and after heat treatment. Journal of Materials Science & Technology, 35(6), 1153-1164.

[34] Xu, Y., Lu, Y., Sundberg, K. L., Liang, J., & Sisson, R. D. (2017). Effect of annealing treatments on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of direct metal laser sintered Ti-6Al-4V. Journal of Materials Engineering and Performance, 26, 2572-2582.

APPLICATION OF COUNTERMEASURES IN ELECTRONIC WARFARE AND STRATEGIC DEFENSE METHODS

Sahure GEÇER
Makine ve Kimya Endüstrisi Anonim Şirketi, Ar-Ge ve Teknoloji Direktörlüğü, Sistem Mühendisliği Müdürlüğü, Emniyet Mahallesi Dögol Cad. No: 2 Anadolu Meydanı 06560 Yenimahalle-Ankara-Türkiye

Uğur GENÇALP, Burak CENGİZ, Tolga Orçun ŞENGÖZ, Yunus Emre KURUM, Ezgi Çiğdem ARPACI, Elvan GÖKSU, Gözde TEKİN, Sevil ERTEKİN, Selim GEMİCİ, Fehim OSMANOĞLU

Makine ve Kimya Endüstrisi Anonim Şirketi
Emniyet Mahallesi Dögol Cad. No: 2 Anadolu Meydanı 06560 Yenimahalle-Ankara-Türkiye
Makina Kimya Endüstrisi Piroteknik Fabrikası Müdürlüğü
Kayaş Mah., Kayaş Cad., No:163, Mamak, Ankara
sahure.gecer@mke.gov.tr (Corresponding Author), +903122961632

Özet

Bu çalışma, modern elektronik harp uygulamaları kapsamında 130 mm Çaf-S ve Spektral Flare mühimmatlarının tasarım, test ve performans değerlendirmelerini kapsamaktadır. Elektronik harp disiplininin tarihçesi, radar ve iletişim teknolojilerinin askerî entegrasyonu ile başlamış ve günümüzde elektromanyetik spektrumun kontrolü ve bilgi üstünlüğü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Çaf mühimmatları, radar sinyallerini güçlü şekilde yansıtarak sahte hedef bulutu oluşturmakta ve radar güdümlü tehditlerin kilitlenmesini kırarak platforma kritik manevra süresi kazandırmaktadır. Spektral flare mühimmatları ise kızılötesi güdümlü tehditlere karşı geliştirilmiş, farklı dalga boylarında ışıma oranı sağlayan karşı-tedbir sistemleridir. Makalede, MKE A.Ş. tarafından üretilen 130 mm Çaf-S mühimmatı ve spektral flare mühimmatlarının yapısal bileşenleri, fonksiyonları ve teknik özellikleri ele alınmış, fabrika seviyesi atışlı test sonuçları sunulmuştur. Çaf-S mühimmatının 8–18 GHz frekans aralığında etkili olduğu, havada patlama süresinin 3,6 saniye ve yüksekliğinin 90 metreyi aştığı tespit edilmiştir. Spektral flare mühimmatının ise STANAG 4687 standartlarına uygun şekilde platformu koruma kapasitesini sağladığı gösterilmiştir. Çalışma, söz konusu mühimmatların tasarım doğrulama ve platform test süreçlerinin önemini vurgulamakta ve elektronik harp alanındaki karşı-tedbir teknolojilerinin etkinliğini değerlendirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektronik Harp, Karşı Tedbir Mühimmatları, Stratejik Savunma, Elektromanyetik Spektrum,

Abstract

The design, testing, and performance assessment of 130 mm Çaf-S and Spectral Flare munitions in relation to contemporary electronic warfare applications are covered in this study. The military's integration of communication and radar technologies marked the beginning of electronic warfare, which is now essential to maintaining information dominance and managing the electromagnetic spectrum. By powerfully reflecting radar signals and disrupting

the lock-on effect of radar-guided threats, Çaf munitions produce a decoy target cloud, giving the platform vital maneuvering time. Spectral flare munitions are countermeasures that provide radiation rates at various wavelengths and were created to counter threats guided by infrared radiation. In addition to presenting factory-level fire test data, this article covers the technical specifications, structural elements, and functions of MKE Inc.'s 130 mm Çaf-S and spectral flare munitions. With a height of more than 90 meters and an air-burst time of 3.6 seconds, the Çaf-S munitions were proven to be effective in the 8–18 GHz frequency band. Platform protection using spectral flare amunition was demonstrated to meet STANAG 4687 requirements. In addition to assessing the efficacy of countermeasure technologies in the sphere of electronic warfare, the study highlights the significance of design verification and platform testing procedures for these guns.

Keywords: Electronic Warfare, Countermeasure Munitions, Strategic Defense, Electromagnetic Spectrum

Giriş

Elektronik harp, modern savaş ortamında askerî üstünlüğün sağlanması amacına hizmet eden ve elektromanyetik dalgaların stratejik bir unsur olarak kullanılmasına dayanan bir disiplin olarak tanımlanmaktadır. Bu alanın tarihsel gelişimi, radyo iletişim teknolojilerinin askerî alana entegre edilmesiyle başlamış; radar teknolojisinin icadı, dijital dönüşüm ve ileri düzey sinyal işleme tekniklerinin gelişimiyle birlikte önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Evans, 2021). Günümüzde elektronik harp, kara, hava, deniz, uzay ve siber harekât alanlarının kesişim noktasında yer almakta ve askerî operasyonların başarısı açısından kritik bir unsur hâline gelmiştir. Modern savaş doktrinleri incelendiğinde, elektromanyetik spektrumun kontrolü ve bilgi üstünlüğünün sağlanması, konvansiyonel ateş gücü kadar belirleyici bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Mahulikar, Sonawane, & Rao, 2007; Saalbach, 2021).

Elektromanyetik spektrum (EMS), farklı frekans aralıklarının kendine özgü fiziksel özellikleri nedeniyle askerî uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. EH; elektronik taarruz (EA), elektronik koruma (EP) ve elektronik destek (ES) bileşenlerini içerir. Spektrumun kullanımı sırasında atmosferik sönüm, difraksiyon, saçılma ve doğrusal görüş gereksinimleri gibi parametreler kritik öneme sahiptir.

Çaf mühimmatları, radar sinyallerini güçlü biçimde yansıtarak sahte hedef bulutu oluşturur. Bu sayede düşman radarında gerçek gemi ile sahte hedefler karışır, füzenin kilitlenmesi bozulur. 1942’de İngilizler, radar ekranlarını yanıltmak amacıyla alüminyum folyo şeritlerden oluşan çaf sistemini ilk kez kullanmışlardır (Cheng & Tsui, 2021). II. Dünya Savaşı’ndaki ilk kullanımından itibaren modern versiyonları geliştirilmiş ve doppler radarlarına karşı farklı teknikler uygulanmıştır (Cheng & Tsui, 2021). Çaf mühimmatı, metalize şeritler veya fiberler içererek 8-18 GHz frekans band aralığında hedef platformu korur. Atıldığında radar sinyallerini güçlü şekilde yansıtır ve düşmanın radarında gerçek geminin yanında birden fazla sahte hedef oluşur. Çaf bulutu, geminin gerçek radar imzasını geçici olarak gölgeye alır. Düşman radarında gerçek gemi, çaf bulutuna karışır ve hedefleme doğruluğu düşer. Radar güdümlü füze, sahte hedefe kilitlenebilir veya kilidi sürekli kaybedip yeniden aramak zorunda kalır. Bu, gemiye kritik saniyeler kazandırır ve manevra yapabilir, ek karşı tedbir uygulayabilir veya füze ateşlendiğinde hedeften uzaklaşabilir. En önemli

parametrelerden birisi olan Radar Kesit Alanı (RKA), bir cismin radar dalgalarını ne kadar yansıttığını ölçen teknik bir parametredir. Birimi genellikle metrekare (m^2) olarak ifade edilir. RKA, bir cismin boyutu, şekli, yüzey malzemesi ve radar dalga boyu ile direkt ilişkilidir. Yani bir gemi, yüzeyi geniş ve metalik olduğu için radara çok güçlü yansır ve büyük bir RKA'a sahiptir.

Flare (Isı Fişeği) mühimmatları, genellikle kızılötesi güdümlü füzeleri yanıltmak amacıyla kullanılan karşı tedbir sistemleridir. Magnezyum ve yüksek yanıcılıkta metaller içererek çok yüksek sıcaklıklarda yanar ve güçlü kızılötesi ışınım üretir. Böylece düşman füzeleri, motor yerine flare'ı hedef alır (Koch, 2000). Modern spektral flare mühimmatları, farklı dalga boylarında ışıma oranı sağlayarak gelişmiş özelliklere sahip füzeleri dahi yanıltabilmektedir (Mahulikar et al., 2007). Spektral ısı fişekleri, kısa dalga boyu (SWIR-bant1) ile orta dalga boyunda (MWIR-bant4) oranlama yaparak hedefe kilitlenen gelişmiş ısı güdümlü tehditlere karşı kullanılan bir karşı-tedbir mühimmatıdır. Spektral ısı fişekleri, yanma reaksiyonu sonucunda MTV bazlı diğer ısı fişeklerine göre daha düşük bir ısı açığa çıkartırlar. Ayrıca bant4 yaptıkları ışınım değeri bant1 yaptıkları değerden daha yüksektir. Spektral ısı fişekleri için kullanılan en ayırt edici parametre ışınım (intensity) oranıdır (Θ). Işınım oranı bant 4'deki ışıma değerinin bant 1'deki ışıma değerine olan oranı olarak tanımlanmaktadır. MTV ısı fişeklerinin ışıma oran değeri 0,7 civarındayken, spektral ısı fişeği kompozisyonunun tepkime sırasında yaydığı minimum ışıma oran değeri en az 2 olmalıdır. Bir başka deyişle bir ısı fişeğinin oran değeri 2'nin üzerinde ise fişeğin spektral özellikte olduğu kabul edilmektedir.

Materyal ve Yöntem

MKE A.Ş. üretimi olan 130 mm Çaf-S mühimmatı üç ana parçadan oluşmaktadır.

- **Çaf Demeti:** Radar sinyallerini en ideal şekilde yansıtacak uzunlukta kesilmiş metalize fiberglastan (alüminyum kaplı cam elyaf) oluşur. Etkili olması istenecek frekans bantlarına özel Çaf dipollerinin uygun çap ve boylarda üretilmesi gerekmektedir.
- **Sevk Sistemi:** Mühimmatın istenilen mesafeye ulaşmasını sağlayan ve enerjik malzemelerin yanması sonucu oluşan basınçla emniyet mekanizmasını aktif hale getiren sistemdir. Aynı zamanda mühimmatın kanatçıklarının açılmasını sağlayarak mühimmatı istenilen mesafeye sevk eder.
- **Atıcı Sistem:** İçerisine konulan çaf mühimmatını elektriksel ateşleme mekanizması ile dışarı fırlatılmasını sağlar. Atışlı testler esnasında hem 45 derece hem 60 derece açı ile lançerden atışlar gerçekleştirilmiştir. Fabrika seviyesi atışlı testler sonrasında mühimmat havada istenilen mesafede başarılı bir şekilde patlayarak fonksiyon göstermiştir.

Spektral Flare mühimmatına ait AR-GE çalışmaları tasarım doğrulama aşamasındadır. Şekil 1'de Fransız marka spektral flare mühimmatı görülmektedir. Spektral Flare mühimmatına ait ana parçalar ve görevleri aşağıdaki gibi verilmektedir.



Şekil 1 Fransız marka spektral flare mühimmatı ve iç görünümü

Tablo 1 Spektral Flare Mühimmatına Ait Ana Parçalar ve Görevleri

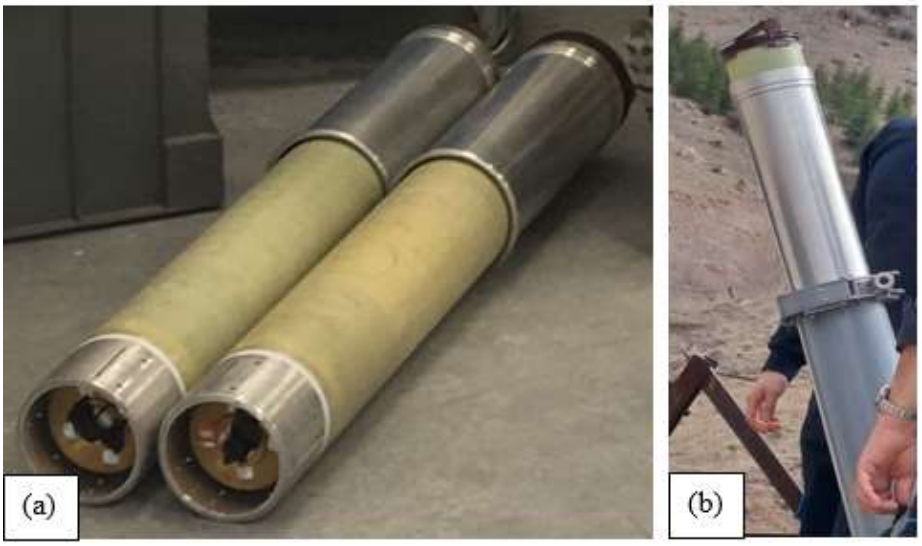
Ana Sistem	Görevi
Gövde / Kovan	Tüm bileşenleri bir arada tutar, fırlatma sistemine mekanik uyum sağlar, yanma sırasında oluşan basınç ve sıcaklığa dayanır.
Yanıcı / Işıma Bileşeni	IR/UV veya geniş bant spektrumda ışıma yaparak güdümlü füzeleri yanıltır, yanma süresini ve spektral dağılımı kontrol eder.
Ateşleme Sistemi	Fırlatma sonrası güvenilir şekilde ateşlemeyi başlatır, gecikme ve sıralamayı kontrol eder, ana karışımın stabil tutuşmasını sağlar.
Güvenlik & Taşıma Donanımı	Depolama/taşıma sırasında kazara ateşlenmeyi engeller, emniyet pimleri ve koruyucu tapalarla güvenlik sağlar.
Paketleme & Arabirim	Mühimmatın uçak/pod/lançer ile entegrasyonunu sağlar, çevresel etkilere karşı korur, lojistik ve mühimmat yönetiminde kolaylık sunar.

Bulgular ve Tartışma

130 mm Çaf-S Mühimmatı: 130 mm Çaf-S Mühimmatı: Fabrika seviyesi atışlı test faaliyetleri tamamlanmıştır. Sonraki süreçte platform seviyesi atışlı test faaliyetlerine geçilerek Radar Kesit Alanı ölçümü yapılması planlanmaktadır. Havada patlama süresi 3,6 saniye olarak ayarlanmıştır ve havada patlama yüksekliği elektronik yükseklik ölçer yardımıyla 90 metreyi aşmıştır. Kullanılan lancer, MKE A.Ş. üretimi olan 130 mm Çaf lançeri olup hem 45 derece hem de 60 derece açı ile kullanılmıştır. Şekil 2'de 130 mm Çaf-S Mühimmatı ve lançere yerleştirilmesi gösterilmekte olup mühimmata ait teknik bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 MKE Mühimmatina Ait Teknik Özellikler

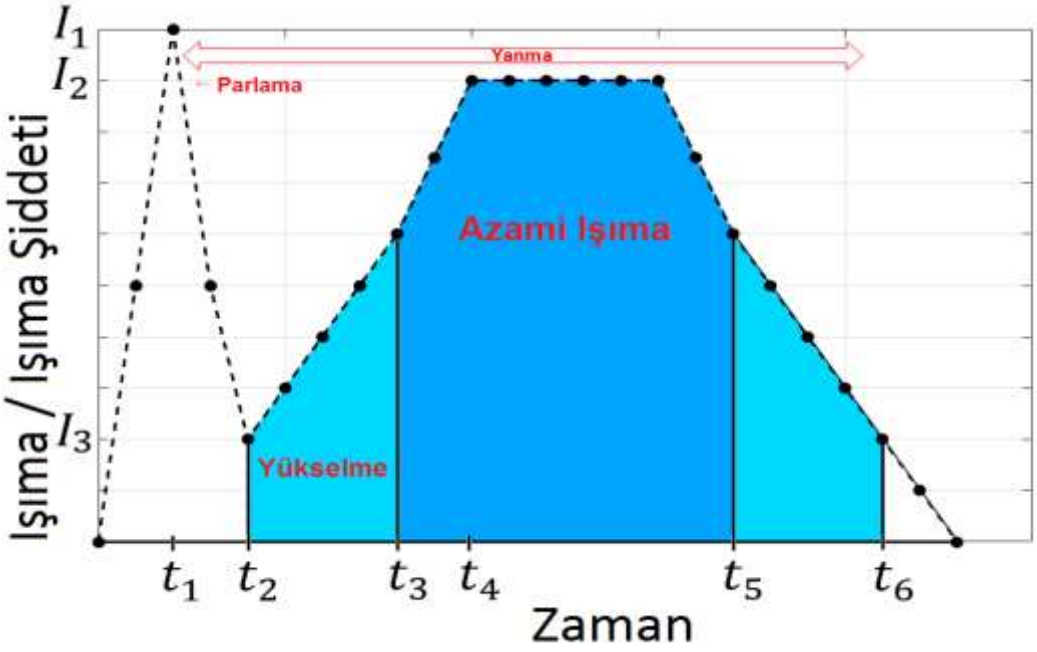
Teknik özellikler	MKE Mühimmatı
Koruma Frekans Aralığı	8-18 GHz
Havada Patlama Yüksekliği (45 derece namlu açısı)	Min 90 m
Havada Patlama Süresi	3.6 s



Şekil 2 (a) 130 mm Çaf-S Mühimmatı ve (b)Mühimmatın lançere yerleştirilmesi.

- **Spektral Flare Mühimmatı**

Mühimmata ait ışınım testleri MKE A.Ş. alt yapısı içerisinde Radrometri laboratuvarında ışınım testleri tamamlanmıştır. Spektral flare mühimmatının lancer sisteminden fırlatıldıktan sonra sahip olması gereken şekil STANAG 4687 standartlarıına uygundur ve Radrometri laboratuvarında ışınım testleri tamamlanmıştır. Lancer sisteminden fırlatıldıktan sonra sahip olması gereken şekil STANAG 4687 standartlarına uygundur ve havada kalma süresi platformu koruma kapasitesini sağlamaktadır (Şekil 3).



Şekil 3 Isı Fişeği Zamansal İz Grafik Örneği

Spektral ısı fişeklerinin hızlı bir şekilde yükselip bir süre havada kalarak yavaşça sönümlenmesi beklenmektedir (Şekil 3). Ayrıca havada kalma süresi ne kadar uzun olursa platformu daha iyi bir şekilde koruyabilme özelliğine sahiptirler. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre MKE A.Ş. üretimi ısı fişekleri STANAG 4687 deki isteri karşıladığı görülmüştür.

Tablo 3 MKE Mühimmatina Ait Teknik Özellikler

Teknik Özellikler	MKE Mühimmatı Spektral Flare
Boyutlar	1”x 1”x 8”
Fırlatma Hızı	min. 20 m/s
Depolama ömrü	:≥9 yıl
Servis ömrü:	≥1 yıl
Işınım Oranı	≥ 2

Sonuç ve Öneriler

130 mm Çaf-S Mühimmatina ait fabrika seviyesi atışlı test faaliyetleri tamamlanmıştır. Sonraki süreçte Platform Seviyesi Atışlı Test Faaliyetlerine geçilerek Radar Kesit Alanı ölçümü yapılması planlanmaktadır. Bu aşamada orjinal mühimmat ile karşılaştırmalı performans testlerinin yapılması planlanmaktadır. Aynı zamanda Çevresel Test Prosedürü MIL-STD-810 G ve MIL-STD-331 standartları baz alınarak hazırlanmıştır.

Spektral Isı Fişeği Projesi tasarım doğrulama aşamasındadır. Radyometri laboratuvarında 4 konfigürasyon olarak atışlı testler gerçekleştirilmiş ve içlerinden iki konfigürasyon belirlenerek bir sonraki aşama olan platrorm seviyesi testlere geçilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Söz konusu projeler, MKE A.Ş. öz kaynakları ile yürütülüyor olup, bu çalışmada katkı ve destek sağlayan MKE A.Ş. yönetici ve teknik personeline teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca Fabrika Seviyesi Atışlı Testler ve AR-GE süreçlerinde emeği geçen tüm ekip üyelerinin özverili çalışmaları, bu makalenin hazırlanmasına önemli katkı sağlamıştır.

Kaynaklar

Cheng, C.-H., & Tsui, J. (2021). Chaff, flare, and decoys. In *An introduction to electronic warfare*. CRC Press.

Evans, G. (2021). *The evolution of electronic warfare*. Global Defence Technology.

Koch, E. (2000). IR emission behavior of magnesium/teflon/viton (MTV) compositions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 25*(1), 37–40.

Mahulikar, S. P., Sonawane, H. R., & Rao, G. A. (2007). Infrared signature studies of aerospace vehicles. *Progress in Aerospace Sciences, 43*(7/8), 218–245.

Saalbach, K. (2021). *Advances in electronic warfare*. Universität Osnabrück.

COMPOSITE MATERIALS USED IN THE MC-21 AIRLINER

Melih Cemal KUSHAN

Prof. Dr., Eskisehir Osmangazi University, Aviation and Space Technologies Application and Research Center, Eskisehir-Turkiye,
erzesk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9427-6192, +905055422393

Abstract

The aviation industry is moving towards lighter, more durable and more efficient materials with developing technology. Today, the use of composite materials has gained an important place in aircraft design, both increasing fuel efficiency and reducing operational costs. In this context, the MC-21 passenger aircraft was produced with an innovative design approach based on the use of composite materials to a large extent.

This study examines in detail the properties of composite materials used in the MC-21 aircraft, their production processes and their contributions to flight performance. It aims to provide a perspective on how these materials can be used more effectively in future aviation applications by emphasizing the increasing importance of composite materials in the aviation sector.

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Vacuum Assisted Manufacturing Techniques, Aerodynamic Efficiency, Weight Reduction

Özet

Havacılık endustrisi, gelisen teknolojiyle birlikte daha hafif, daha dayanıklı ve daha verimli malzemelere yönelmektedir. Gunumuzde kompozit malzemelerin kullanımı, uçak tasarımında önemli bir yer kazanmıs olup hem yakıt verimliligini artırmakta hem de operasyonel maliyetleri azaltmaktadır. Bu baglamda, MC-21 yolcu uçagı, buyuk ölçude kompozit malzemelerin kullanımına dayanan yenilikçi bir tasarım yaklasımıyla uretilmistir.

Bu çalısmada, MC-21 uçagında kullanılan kompozit malzemelerin özellikleri, uretim sureçleri ve uçus performansına katkıları ayrıntılı olarak incelenmistir. Çalısma ayrıca, kompozit malzemelerin havacılık sektörundeki artan önemini vurgulayarak, bu malzemelerin gelecekteki havacılık uygulamalarında nasıl daha etkin kullanılabilecegine dair bir bakıs açısı sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP), Vakum Destekli Uretim Teknikleri, Aerodinamik Verimlilik, Agırlık Azaltma

Introduction

For decades, the aerospace industry has sought materials that could reduce weight without sacrificing strength or safety. Composites, specifically carbon fiber-reinforced polymers

(CFRPs), have emerged as a solution to this challenge (Rana & Fangueiro, 2016). The MC-21 passenger aircraft (Fig. 1), developed by the Irkut Company of the United Aircraft Corporation (UAC), represents a significant milestone in Russia's civil aviation sector, making its first flight in 2017 (Serdyukov & Cluster, 2018). The extensive use of composites, especially CFRP-based structures, provides superior aerodynamic efficiency, improved durability and reduced operational costs.

Comparative studies with other new-generation airliners, such as the Chinese C919 (Gurgen et al., 2018), the ARJ21 (Kushan, 2024), and the Russian SSJ100 (Kushan & Keskin, 2018), highlight the growing reliance on composites in civil aviation. Furthermore, advances in sustainable composites such as cork-based systems offer future perspectives for eco-friendly aerospace solutions (Silva et al., 2022; Gurgen et al., 2021a).



Figure 1. Second MC-21-300 aircraft in flight test programme (Serdyukov & Cluster, 2018)

Materials and Methods

This study is based on a comprehensive literature review of composite materials used in the MC-21 airliner. Data was collected from technical reports, scientific papers, and industry documents related to the manufacturing processes, structural applications, and performance evaluations of the MC-21. Comparative analysis was also conducted with other aircraft such as the A320neo, Boeing 737MAX, C919, ARJ21, and SSJ100. Special focus was placed on carbon fiber-reinforced polymers (CFRPs), vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM), autoclave processing, and non-destructive testing (Eroglu et al., 2021). Sustainability and eco-friendly material alternatives were also considered (Sheikhi et al., 2021).

Findings and Discussion

AeroComposit is working in close cooperation with the Moscow-based aircraft OEM, Irkut and worked with a variety of experts worldwide to develop the structural design and the materials, as well as a repeatable process to achieve the requisite precision and quality. These included resin, fiber and prepreg suppliers Hexcel (Stamford, Conn.) and Cytec (Woodland Park, N.J.); FACC for the wingbox; Diamond Aircraft (Wiener Neustadt, Austria) for the wing;

dry fiber placement and automated assembly equipment manufacturer MTorres (Pamplona, Spain); and infusion equipment supplier Stevik (Cergy, France)(Gardiner, 2014) . The MC-21 employs a high percentage of composite materials, particularly in its wings and fuselage panels. The wing set (Fig. 2) was manufactured using infusion technology patented by Russia. The use of composite materials allowed the wings of the MC-21 to have a high aspect ratio of 11.5, higher than that of older jets of the same size (Ricardo, 2021). About 40% of the aircraft's structural weight uses composite materials (primarily CFRPs), which significantly reduces overall mass while enhancing fuel efficiency and range. Bar chart showing approximate composite (CFRP-dominant) vs. other material share in the MC-21 structure. The ~40% composite figure is taken from (Kaminsky, 2021) (Fig. 3). The wing box and wing panels are entirely fabricated from CFRP using vacuum infusion with out-of-autoclave (OOA) oven cure. This approach reduces production cost and time while maintaining high structural reliability.



Figure 2. MC-21 wing panels (Ricardo, 2021)

Comparisons with other aircraft reveal that while Boeing 737MAX and Airbus A320neo rely primarily on aluminum alloys, the MC-21 demonstrates a more aggressive adoption of composites. Similar strategies can be observed in the Chinese C919 (Gurgen et al., 2018), the ARJ21 (Kushan, 2024), and Russia’s earlier SSJ100 program (Kushan & Keskin, 2018). Moreover, non-destructive testing methods such as thermographic analysis ensure the structural reliability of these advanced composites (Eroglu et al., 2021).

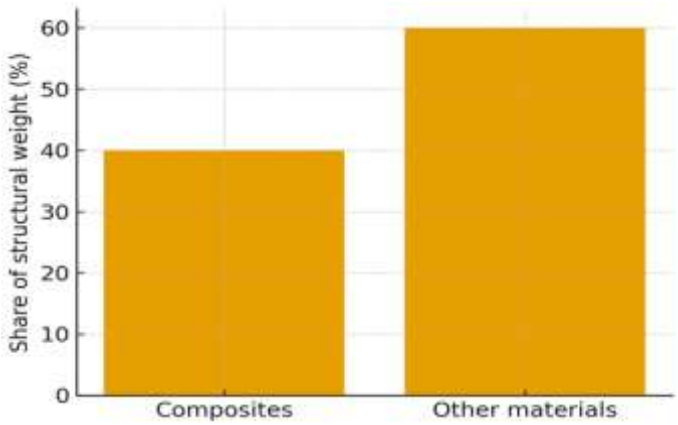


Figure 3. MC-21 Structural weight composition (Kaminsky, 2021)

Beyond CFRPs, research into sustainable materials such as cork composites has shown promise for energy absorption and vibration damping in aerospace (Gurgen et al., 2021b; Sheikhi et al., 2021). Smart sandwich structures enhanced with multifunctional shear-thickening fluids provide anti-vibration and electrical conductivity properties (Sheikhi et al., 2023), which could be integrated into future designs. Additionally, composite applications extend into the defense sector, such as lightweight armor for helicopters (Kushan et al., 2021), highlighting the dual-use potential of such materials. Key Technical Facts and Sources are shown in Table 1

The MC-21 employs a high percentage of composite materials, particularly in its wings and fuselage panels. About 40% of the aircraft's structural weight uses composite materials (primarily CFRPs), which significantly reduces overall mass while enhancing fuel efficiency and range. The wing box and wing panels are entirely fabricated from CFRP using vacuum infusion with out-of-autoclave (OOA) oven cure (Fig. 4). This approach reduces production cost and time while maintaining high structural reliability.

Table 1. Key Technical Facts and Sources

Technical point	MC-21 Fact	Source
Composite share of structural weight (approx.)	~40%	FlightGlobal, 28 Dec 2021: 'Irkut MC-21-300 obtains initial Russian type certification'
Wing & wingbox manufacturing route	Resin infusion with out-of-autoclave (OOA) oven cure	CompositesWorld, 2014: 'Resin-infused MS-21 wings and wingbox'
Composite wing material origin (domestic)	Wings made of Russian-sourced composites (flight test milestone)	Rostec press release, 25 Dec 2021

Aerodynamic benefit statement	High-aspect-ratio wing & improved aerodynamics enabled by composites	CompositesWorld, 3 Dec 2021

Comparisons with other aircraft reveal that while Boeing 737MAX and Airbus A320neo rely primarily on aluminum alloys, the MC-21 demonstrates a more aggressive adoption of composites (Table 2.). Similar strategies can be observed in the Chinese C919 (Gurgen et al., 2018), the ARJ21 (Kushan, 2024), and Russia's earlier SSJ100 program (Kushan & Keskin, 2018). Moreover, non-destructive testing methods such as thermographic analysis ensure the structural reliability of these advanced composites (Eroglu et al., 2021).

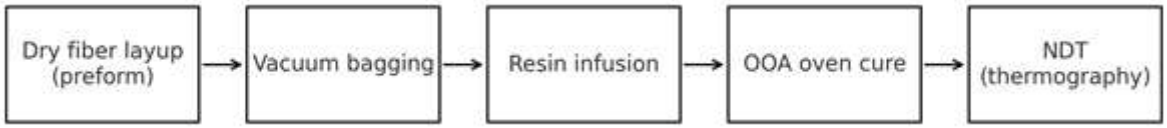


Figure 4. Sustainable & Smart Composites (Concept Map) (Swiderski, 2015)

Beyond CFRPs, research into sustainable materials such as cork composites has shown promise for energy absorption and vibration damping in aerospace (Gurgen et al., 2021b; Sheikhi et al., 2021). Smart sandwich structures enhanced with multifunctional shear-thickening fluids provide anti-vibration and electrical conductivity properties (Sheikhi et al., 2023), which could be integrated into future designs. Additionally, composite applications extend into the defense sector, such as lightweight armor for helicopters (Kushan et al., 2021), highlighting the dual-use potential of such materials.

Conclusion and Recommendations

The MC-21 represents a new milestone in the use of composites in civil aviation, setting a higher benchmark for weight reduction, aerodynamic efficiency, and operational economy. By incorporating CFRP wings and fuselage sections, the aircraft achieves significant performance improvements compared to conventional aluminum-based counterparts.

Table 2. Materials Strategy by Program (qualitative + numbers where verified)

Program	Materials Strategy (summary)	Approx. Composite % (if available)
MC-21	Aggressive composites; resin-infused CFRP wing/wingbox (OOA)	~40%
C919	Conservative vs MC-21; composites in secondary structures	~12%
ARJ21	Minimal composites in early configs	~1–2%

Future research directions point toward the integration of sustainable and smart composites, such as cork-based and shear-thickening fluid systems, to enhance both eco-friendliness and multifunctionality. Additionally, non-destructive testing methods remain crucial to ensure

structural integrity. Lessons learned from parallel aircraft programs like the C919, ARJ21, and SSJ100—many of which have been analyzed in previous studies by the author—further contextualize the role of composites in modern aviation.

In conclusion, the MC-21 demonstrates not only technological progress but also offers a glimpse into the sustainable and intelligent composite solutions that will shape the future of both civil and defense aerospace applications.

Thanks and Information Note

This paper will be presented at the "International Defense Industry Symposium and Exhibition '25" on 16–18 October 2025. The author gratefully acknowledges financial support from TUBITAK under the 2224-B International Scientific Meetings Participation Support Program. The sponsor had no role in the study design, data collection, analysis, or interpretation; the views expressed are solely those of the author and do not necessarily reflect the views of TUBITAK. The author also thanks the symposium organizers, the scientific committee, and the reviewers for their valuable comments and support.

References

Baker, A., Dutton, S., & Kelly, D. (2016). *Composite Materials for Aircraft Structures (2nd Ed.)*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Eroglu, E., Diltemiz, F., Kushan, M.C., & Gurgen, S. (2021). *Uçak Kompozit Yapılarında Termografik Analiz ile Tahribatsız Muayene*. 8th International Fiber and Polymer Research Symposium, Eskisehir.

Gardiner, G. (2014), *Resin-infused MS-21 wings and wingbox*, Composites World, www.compositesworld.com

Greenhalgh, E.S. (2013). *Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites*. Woodhead Publishing.

Gurgen, S., Fernandes, F.A.O., Sousa, R.J.A., & Kushan, M.C. (2021a). *Development of eco-friendly shock-absorbing cork composites enhanced by a non-Newtonian fluid*. Applied Composite Materials.

Gurgen, S., Sert, A., & Kushan, M.C. (2021). *An investigation on wear behavior of UHMWPE/carbide composites at elevated temperatures. Journal of Applied Polymer Science*.

Gurgen, S., Sofuoglu, A., Çakır, F.H., & Kushan, M.C. (2018). *Composite Structures of C919*. Elixir Mechanical Engineering, 122, 51767–51770.

Gurgen, S., Çakır, F., Sofuoglu, M.A., & Kushan, M.C. (2018). *Composite Structures of C919*. Proceedings of Conferencefora, 8th International Conference, Singapore.

Irkut Corporation. (2020). *MC-21 Aircraft Program Overview*. Technical Report.

Irkut Corporation. (2021). *MC-21 Technical Data and Composite Structures*. Press Release.

Kaminsky, D. (2021), Irkut MC-21-300 obtains initial Russian type certification, Flight Global, 28 December 2021

Kushan, M.C. (2024). *Composite Materials Used in ARJ21 Aircraft*. International Scientific Research and Innovation Congress II, Adana.

Kushan, M.C., & Keskin, G. (2018). *Composite Structures of SSJ100*. International Symposium on Aircraft Technology, MRO & Operations, Istanbul.

Kushan, M.C., Çetin, B., Tonbul, K., Teoman, A., & Göde, E. (2021). *Composite Lightweight Armor Design Alternatives for Helicopters*. KOMPEGE 2021, Antalya.

Nehls, G,. (2021). *Irkut completes final assembly of composite-intensive MS-21-300 aircraft*, Composites World, www.compositesworld.com

Ricardo, M. (2021), *MC-21-300 receives first wing of composite material made in Russia*, ADN, www.airdatanews.com

Rana, S., & Fangueiro, R. (2016). *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing.

Rostec, (2021). *Airliner MC-21-300 with Wings Made of Russian Composites Performs its First Flight*, December 25, 2021

Serdyukov, A., & Cluster, A. (2018). *Second MC-21-300 aircraft in flight test programme*. Vayu Aerospace and Defence Review, 4, 81.

Sheikhi, M.R., Gurgen, S., & Kushan, M.C. (2021). *Cork Composites in Aerospace Applications*. ISATECH, Eskisehir.

Sheikhi, M.R., Gurgen, S., Li, J., Sofuoglu, M.A., Hasanzadeh, M., Kushan, M.C., & Chen, Z. (2023). *Design of smart sandwich structures enhanced by multi-functional shear thickening fluids (M–STFs): Anti-vibration and electrical conductivity*. Composite Structures, 324.

Silva, S., Fernandes, F., Sousa, R., Pereira, A., Verdum, M., Mares, A., Ptak, M., Sawicki, M., Leonavičiūte, V., Nugaras, J., Kushan, M.C., Sofuoglu, A., & Gurgen, S. (2022). *Sustainable and Eco-friendly Cork Composites in Aerospace Engineering: Educational Perspective*. TEchMA2022, University of Aveiro.

Swiderski, W., (2015), *IR Thermography Nondestructive Testing Methods of Composite Materials Used in Aerospace Applications*. Researchgate, http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2015.0016

Tiwari, A., & Sahoo, S. (2019). *Composite Materials in Aerospace Applications*. Journal of Aerospace Science and Technology, 45, 123–134.

Uzunonat, Y., Uzgur, S., Diltemiz, S.F., Kushan, M.C., & Ölmez, R. (2011). *MoSi2 Composites for High Temperature Structural Applications*. Advanced Materials Research, 103–107, 214.

MULTISCALE MODELLING OF RANDOMLY-DISTRIBUTED- NANOMATERIAL-BASED NANOCOMPOSITES WITH INTERFACIAL INTERACTIONS

Hilal GÜLŞEN

Research Assistant, Cappadocia University, School of Applied Sciences, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Cappadocia University, Nevsehir- Türkiye, **(**Corresponding Author)
hilal.gulsen@kapadokya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0165-3436,

Umut ÇALIŞKAN

Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Kayseri -Türkiye
ucaliskan@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8043-2799,

Abstract

This paper presents a new multi-scale modeling approach was developed to simulate the random distribution of carbon-based nanostructures within an epoxy matrix using the finite element method. In nanoparticle-reinforced nanocomposites, the volume fraction, chirality, distribution, orientation, and the overall behavior of the polymer affect the properties of the nanocomposite. Therefore, modeling and simulations are crucial for investigating the effects of adding nanoparticles to polymers. The model incorporates a three-part structure consisting of nanoparticle, an interface material, and their Van der Waals interactions. A special algorithm was created to randomly position these structures within a representative control volume without overlap, considering the geometric dimensions and number of single-layer graphene sheets and carbon nanotubes. Different nanoparticle volume ratios were used to evaluate their impact on the material properties. Since modeling the actual size and random distribution of nanoparticles in epoxy is highly complex, a novel algorithm was proposed to realistically represent the interface and interaction regions. The algorithm was implemented in Python and integrated into ABAQUS through scripting. Graphene was used as a nanomaterial and epoxy was used as a polymer matrix. Results from randomly distributed RVE models showed better agreement with experimental data compared to simpler models, demonstrating the importance of realistic nanomaterial distribution in numerical simulations

Keywords: Multiscale Modelling, Nanocomposite, FEM, Represented volume element, Van der Walls interactions.

Introduction

The importance of nanoscale materials and their applications in engineering has increased due to the advancement of nanotechnology. These materials have wide applications across various industries, offering more functional and high-performance solutions compared to traditional materials. Graphene and carbon nanotubes, which belong to the family of carbon-based nanomaterials, are attracting considerable interest in engineering fields due to their superior mechanical, thermal, magnetic and electrical properties. Graphene and carbon nanotubes are highly important as reinforcing materials among nanomaterials due to their excellent

mechanical properties. In graphene and carbon nanotube-reinforced nanocomposites, diameter and chirality, distribution, orientation, and the overall behaviour of the polymer affect the properties of the nanocomposite. Therefore, modelling and simulations are crucial in predicting and investigating the effect of nanoparticles added to polymer matrices. Khalili and Haghbin investigated the effects of the volume fraction, diameter, and chirality of SWCNTs on the non-linear tensile behaviour of nanocomposites using multi-scale modelling. The results showed that armchair-type SWCNTs made the composites stiffer than zigzag-type SWCNTs, and that using smaller-diameter nanotubes increased the tensile strength of the nanocomposites(Khalili & Haghbin, 2011). Tserpes et al. developed a multiscale RVE combining nano- and mesoscopic scales to model the tensile behaviour of carbon nanotube-reinforced composites. In the model, the behaviour of the nanotubes was represented by a progressive fracture model based on a modified Morse potential, while the matrix was represented using the finite element method. Furthermore, the effect of interfacial shear strength on tensile behaviour was investigated; it was determined that the elastic modulus remained unchanged, but tensile strength decreased significantly as shear strength decreased (Tserpes et al.,2008) Rafiee and Eskandariyun developed a nano-scale continuum model to estimate the elasticity modulus of graphene layers. In the study, carbon-carbon bonds were modelled as beam/spring elements, the effect of layer dimensions was analysed, and finally, a stochastic analysis was conducted by treating the number and positions of layers as random parameters (Rafiee & Eskandariyum,2017). Guo et al. developed a novel multiscale finite element method combining atomic and macroscopic scales to investigate the mechanical properties of graphene-reinforced composites. In the study, the composite was modelled as a space frame with graphene beam elements, and the matrix and interface were assumed to be homogeneous and isotropic. The analyses showed that the graphene volume fraction and layer dimensions significantly increased the elastic modulus, and that the layer inclination angle also affected the mechanical behaviour (Guo et al., 2018) Zrasvand et al. investigated the mechanical properties of two-phase and hybrid nanocomposites with an epoxy matrix using MWCNT and graphene nanoplatelets through experimental, micromechanical, and numerical methods. The study investigated the effect of matrix-aligned and randomly distributed reinforcements, analysing three different nanofiller models (MWCNT, GNP, and hybrid). More realistic models were developed using randomly distributed reinforcements, and it was determined that the numerical results showed good agreement with the modified Halpin-Tsai method and experimental data (Zrasvand et al.,2019)

This study focuses on investigating the mechanical properties of graphene and carbon nanotube nanocomposites using the multiscale finite element method (FEM). The multiscale approach allows us to examine the interactions between graphene, CNTs, and the surrounding matrix at different length scales, thereby providing a more accurate representation of the material's behaviour. The aim is to bridge the gap between the nano-scale and macro-scale behaviour of graphene and CNT nanocomposites using the FEM method and to comprehensively understand their mechanical properties.

Modelling Method

Geometry of Graphene Sheet

The graphene sheet is a hexagonal lattice system in which each carbon atom is bonded to its three nearest neighbours by extremely strong covalent bonds, each 1.421 Å in length. The electrical and mechanical properties of graphene sheets vary according to the length and direction of the vector describing the atomic arrangement of these bonds.

This vector, i.e. the chiral vector or chirality index Ch, is derived from the two vectors a1 and a2 of the unit cell in the carbon nanotube. The chiral vector consists of n units of a1 and m units of a2, as shown in Figure 1.

$C_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$, bn ≥ m, (1)

The chirality index, denoted by (n,m), defines the length and direction of the chiral vector of the carbon nanotube and, consequently, the diameter of the bonds relative to the nanotube axis. Since the chiral vector of length L rolls up to form the nanotube, the nanotube diameter is obtained from the following equation [12].

$$D = \frac{L}{\pi} = \frac{a(3(n^2+m^2+nm))^{\frac{1}{2}}}{\pi} \quad (2)$$

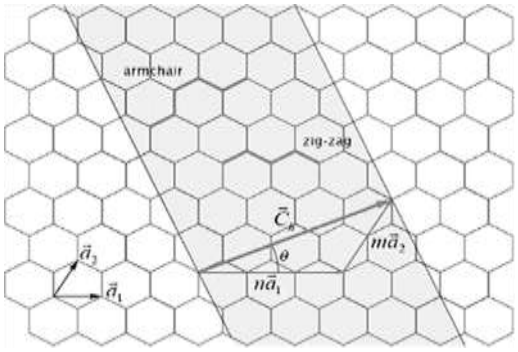


Figure 1. Schematic diagram of graphene sheet

Modelling Molecular Mechanical Interactions

In the molecular mechanics modeling approach, the atomic interactions within graphene sheets and carbon nanotubes are described through the total potential energy functions. This energy consists of five main components: bond stretching $\boldsymbol{U_r}$, bond angle bending, $\boldsymbol{U_\theta}$, dihedral torsion, $\boldsymbol{U_\emptyset}$, out-of-plane torsion, $\boldsymbol{U_W}$, and van der Waals interactions $\boldsymbol{U_{vdw}}$ (Khalili, S. M. R., & Haghbin, A. ,2013).

The graphene structure is represented by the space-frame method, where carbon atoms are modeled as nodes and C–C bonds as beam elements. The behavior of these bonds is expressed by harmonic potential functions derived from Amber force field parameters:

$$\frac{EA}{L} = k_r, \frac{EI}{L} = k_\theta, \frac{GJ}{L} = k_\tau, \quad \textbf{(11)}$$

Beam elements are expressed from a circular cross-section. Considering the molecular mechanical parameters from the amber force field, the beam elements E, G and diameter (d) are made available for application in structural mechanics modeling with the following relations:

$$d = 4\sqrt{\frac{k_\theta}{k_r}}, E = \frac{k_r^2 L}{4\pi k_\theta}, G = \frac{k_r^2 k_\tau L}{8\pi k_\theta^2} \quad \textbf{(12)}$$

Table 2. Amber Force Field Constants (Khalili, S. M. R., & Haghbin, A., 2013.)

k_r ,	938 kcal mol^{-1} A^{-2}	$6.52x10^{-7}$ N $nm^{-1}rad^{-2}$
k_θ ,	126 kcal $mol^{-1}rad^{-2}$	$8.76x10^{-10}$ N nm rad^{-2}
k_τ ,	40 kcal mol^{-1} rad^{-2}	$2.78x10^{-10}$ N nm rad^{-2}

The mechanical properties of the beam elements are as follows:

Table 3. Mechanical properties of beam elements

d	0.147 nm
E	5.49 TPa
G	0.87 TPa

This formulation was applied in the finite element method by solving the system of matrices that are derived for circular two-node beam elements. Each node has six degrees of freedom (DOF), three translational (x, y, z) and three rotational degrees of freedom (DoF).

Modeling of Nanoparticles with Representative Volume Element, RVE

In the study, linear Euler-Bernoulli beam elements with six degrees of freedom were used in molecular mechanical modelling. These elements were based on elastic parameters such as Young's modulus (E), shear modulus (G), and diameter obtained through molecular structural modelling. A space-frame model was created based on the coordinates of carbon atoms, and beam elements were placed between these atoms according to the chirality properties of graphene layers. Both graphene and carbon nanotubes were used in ABAQUS simulations, considering different chirality vectors and weight ratios. The graphene layers and carbon nanotubes used are shown in Figure 2.

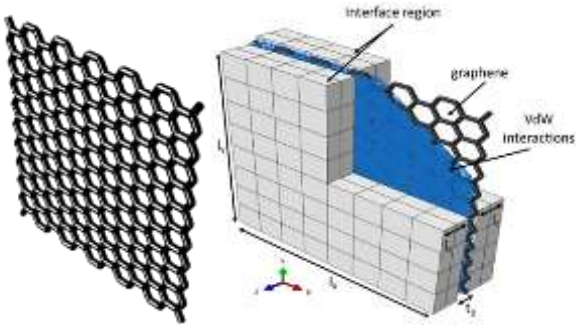


Figure 2. The graphene and RVE were modelled using the ABAQUS software.

Randomly Distributed Algorithm

This study proposed a new random distribution algorithm to model the realistic behaviour of graphene-reinforced nanocomposites. The algorithm was developed using the open-source programming language Python, in which the finite element code was also written. The following steps were taken to create a random distribution algorithm for nanoparticles in a polymer matrix that do not intersect each other:

- Input step: Input data is required for the algorithmic logic to function correctly.
- Drawing step: The control volume dimensions, as provided by the user, are used to determine a point in three-dimensional space.
- Generating random coordinate step: At this step, it is necessary to employ random coordinates for the positioning of the drawn geometries within the control volume.
- Moving step: The graphene particles situated at the core of the control volume are positioned by randomly generated coordinates, with the reference point situated at the centre of the graphene.
- Checking intersection step: The steps of the developed algorithm up to this point include utilizing classical methods. Once the graphene has been randomly positioned within the control volume, it is essential to ascertain whether any of the graphene cross-sections intersect with the control above volume.
- Output step: The coordinates, as specified in the written algorithm, are imported into a text file.

Interactions Between Nanoparticles and Epoxy

Interfacial interactions between the matrix and the reinforcement have a significant impact on the overall properties of nanocomposites. Electrostatic interactions are negligible compared to van der Waals interactions, which contribute three orders of magnitude more than electrostatic energy. The non-linear Van der Waals force with respect to the interatomic distance is explained by the 6/12-Lennard-Jones equation(Battezzati, L., Pisani, C., & Ricca, F.,1975).

$$F_{udW} = \frac{48e}{r}\left[-\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} + 0.5\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{6}\right]$$

Lennard-jones parameters, e and σ, are 0.4396 kJmol^{-1} and 0.3851 nm, respectively (Shokrieh, Z., & Shokrieh, M. M., 2019).The interactions between the carbon atoms of the CNT and the nodes of the inner surface of the surrounding polymers will be modeled using the axial translation connector type (CONN3D2) for the Van der Waals interaction. These linear

elements, which have different names in the finite element method, are named 'connector elements' in the ABAQUS software. In this way, only the Van der Waals interaction between the GNP node (atom) and the adjacent nodes of the polymer will be created. Van der Waals force is a non-linear force and can be neglected when the interatomic distance is greater than or equal to 0.85 nm as shown in Figure 3 (Shokrieh, Z., & Shokrieh, M. M., 2019).

Between these nodes, a code would be written to form an element with distances less than 0.85 nm, and van Der Waals bonds would be formed only between the carbon atoms of the carbon nanotube or graphene and the inner surface of the polymer.

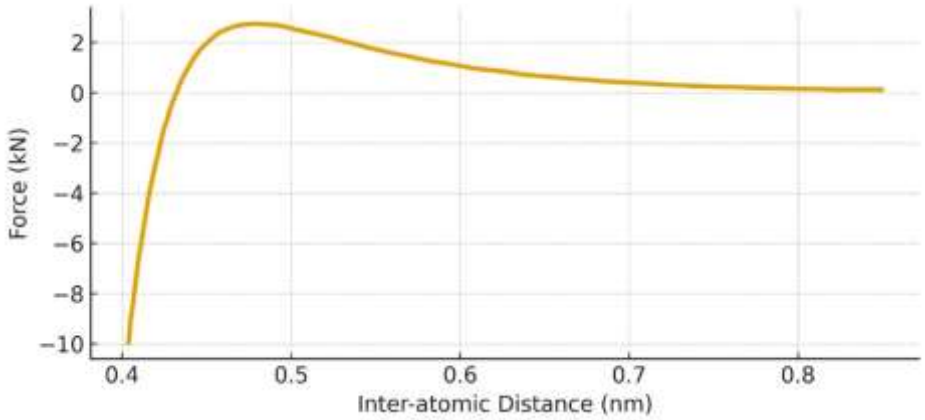


Figure 3. Graph of Van der Waals forces-interatomic distance change

Modelled Representative Volume Elements (RVE)

At this stage, the purpose and originality of the study are explained in detail. In this study, the case of randomly dispersed 10 GNP in a representative volume element at 0.5, 1, 2% volume was investigated for one direction. In such conditions, the dimensions were shaped based on the specified volume ratio and number of GNPs. GNPs were randomly positioned within the cubic volume element, and interfacial phases initially formed around them. Van der Waals interactions were established for each GNP with its respective phase under the defined conditions.

For the compressive behavior of GNP nanocomposite, the total force was calculated by applying 10% displacement to the RVE. The randomly distributed algorithm generates different coordinates with each run. In this context, to examine the isotropic behavior of the structure, loadings along three different axes were made and the results were compared for each axis and for the different axes of each RVE**.**

Findings and Discussion

Using a multi-scale modelling approach, the effects of randomly distributed graphene at different volume fractions on the epoxy matrix were investigated. The results obtained from RVE models created by considering van der Waals interactions were compared with pure epoxy. In the stress–strain graph shown in Figure 5, it was observed that higher stress values

were obtained for samples reinforced with graphene at volume fractions of 0.5%, 1% and 2% compared to pure epoxy. Particularly at a 2% volume ratio, the steeper slope of the curve indicates increased rigidity and load-bearing capacity. This demonstrates that the addition of graphene nanoplatelets to the matrix improves load transfer and results in a more rigid structure under deformation. While the elastic modulus of pure epoxy was approximately 2.7 GPa, a small increase was observed with a 0.5% GNP addition, and a significant increase occurred at 1% and especially 2% ratios. The highest elastic modulus was achieved at around 3.5 GPa with a 2% graphene addition.

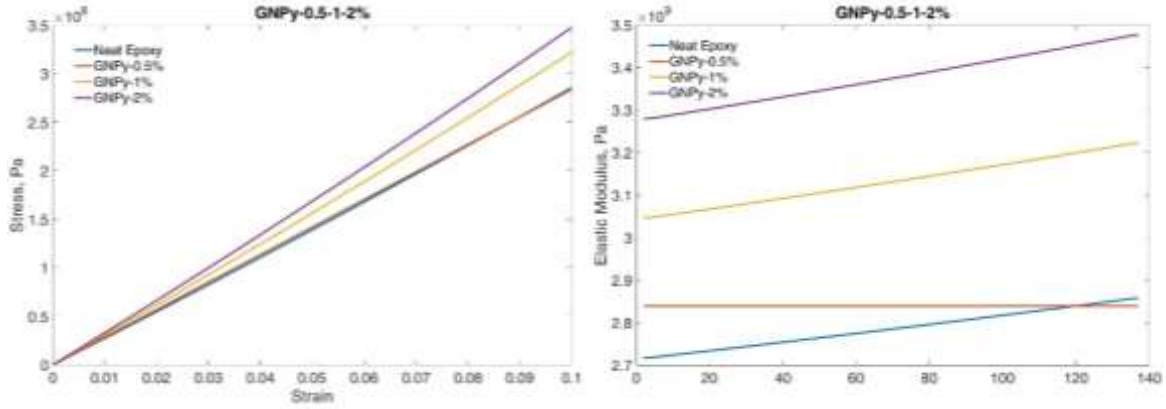
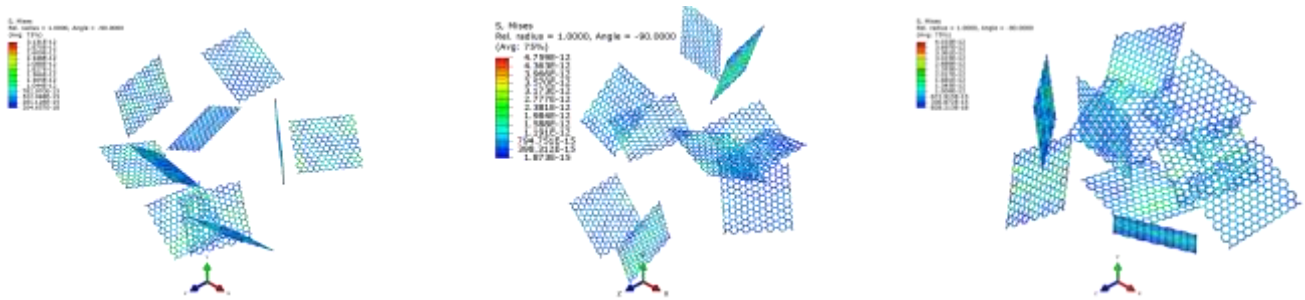


Figure 5. The effect of compressive direction on the stress-strain behavior and elastic modulus

At a volume ratio of 0.5%, GNP layers are distributed more homogeneously and evenly, while at a volume ratio of 1%, some clustering begins to be observed, and at a ratio of 2%, distinct agglomerations form (Figure 6). This situation demonstrates that, despite the elastic modulus increasing as the additive ratio increases, homogeneity decreases. When stress changes are examined, it is also observed that load transfer to the graphene occurs.



0.5% GNP10 1% GNP10 2% GNP10

Figure 6. Stress distribution of GNP10/polymer nanocomposite with different volume fraction under compressive load

Conclusion and Recommendations

In this work, the effects of graphene nanoplatelet reinforcement on the mechanical properties of the epoxy matrix were investigated using numerical methods. Compression tests showed that as the reinforcement ratio increased, the elastic modulus increased and rigidity increased. When examining the stress distributions in the graphs and graphs, it was observed that the modelled work functioned successfully.

References

Battezzati, L., Pisani, C., & Ricca, F. (1975). Equilibrium conformation and surface motion of hydrocarbon molecules physisorbed on graphite. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics, 71,* 1629–1639.

Guo, Z., Song, L., Chai, G. B., Li, Z., Li, Y., & Wang, Z. (2018). Multiscale finite element analyses on mechanical properties of graphene-reinforced composites. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 0*(0), 1–8.

Khalili, S. M. R., & Haghbin, A. (2011). Multi-scale modeling of nonlinear tensile behavior in single-walled carbon nanotube reinforced nanocomposites. *International Journal of Modeling and Optimization, 1*(3), 199–204.

Khalili, S. M. R., & Haghbin, A. (2013). Investigation on design parameters of single-walled carbon nanotube reinforced nanocomposites under impact loads. *Composite Structures, 98,* 253–260.

Rafiee, R., & Eskandariyun, A. (2017). Comparative study on predicting Young's modulus of graphene sheets using nano-scale continuum mechanics approach. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 90,* 42–48.

Shokrieh, Z., & Shokrieh, M. M. (2019). A new model to simulate the creep behavior of graphene/epoxy nanocomposites. *Polymer Testing, 75*, 321-326.

Tserpes, K. I., Papanikos, P., Labeas, G., & Pantelakis, S. (2008). Multi-scale modeling of tensile behavior of carbon nanotube-reinforced composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 49*(1), 51–60.

Zarasvand, K. A., Golestanian, H., & Zarasvand, K. A. (2019). Effects of arrangement and shape of MWCNT and GNP reinforcements on nanocomposite mechanical properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 38*(19), 846–859.

GRAFEN NANOPARTİKÜL KATKILI SERAMİK/KOMPOZİT VÜCUT ZIRHININ TASARIMI, ÜRETİMİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Halil Burak MUTU, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tokat -Türkiye
halilburak.mutu@gop.edu.tr, ORCID:0000-0002-0679-5874, +905061442266

Prof. Dr. Alaettin ÖZER, Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat-Türkiye
alaettin.ozer@bozok.edu.tr(Corresponding Author) ORCID:0000-0002-3499-1215, +905327876510

ÖZET

Bu çalışmada, ön katmanı alümina seramikten destek katmanı karbon fiber ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenden (UHMWPE) oluşan çok katmanlı seramik/kompozit balistik zırhların 7.62 x 63 M2 kalibreli zırh delici (AP) mermilerin etkisi altındaki performansı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Çalışmada kullanılan alümina seramikler 100 mm x 100 mm x 12 mm ölçülerindedir. Ön seramik katman, 3 K 2 / 2 twill dokuma karbon fiber prepreg ve 0° / 90° / 0° / 90° diziliminde Dyneema HB26 prepreg' den oluşan hibrit kompozit yapılar ile desteklenmiştir. Kompozit tabakalar 190 mm x 175 mm ölçülerindedir. Tüm numunelerde kompozit yapının toplam kalınlığı 10 mm' dir. Ayırıca bu çalışmada seramik ve kompozit yapıyı birleştirmede kullanılan poliüretan yapıştırıcıya grafen nanopartikül eklenerek, nanopartikül katkısının zırhların balistik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Balistik test sonuçlarına göre üretilen tüm zırhlarda kısmi penetrasyon gözlemlenmiştir. Ön seramik katman merminin aşınmasına neden olmuştur ve üzerinde mantarlaşma etkisi oluşmuştur.Grafen nanopartikül katkılı zırhların balistik test sonuçlarından elde edilen bulgular incelendiğinde poliüretan yapıştırıcıya grafen katkısının alümina ön katmanlı zırhların balistik özelliklerinde yaklaşık %15 oranında artış belirlenmiştir. Grafen nanopartikül katkılı poliüretan yapıştırıcı, seramik zırhtan kalan kinetik enerjiyi emerek destek katmanı olan kompozit yapıda daha düşük bombeye sebep olmuştur. Grafen nanopartiküllerin, içine katılan yapıştırıcı matris malzemenin mukavemetini arttırdığı, onunla birlikte adeta bir kompozit tabaka gibi davrandığı ve ayrıca katmanların daha iyi yapışmasını sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alümina, Karbon fiber, UHMWPE, Grafen

DESIGN, PRODUCTION AND INVESTIGATION OF BALLISTIC PROPERTIES OF GRAPHENE NANOPARTICLE INCORPORATED CERAMIC/COMPOSITE BODY ARMOR

ABSTRACT

In this study, the performance of multilayer ceramic/composite ballistic armor consisting of a front layer of alumina ceramic and a support layer of carbon fiber and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under the impact of 7.62 x 63 M2 caliber armor-piercing (AP) bullets was investigated experimentally. The alumina ceramics used in the study have the dimensions of 100 mm x 100 mm x 12 mm. The front ceramic layer is supported by hybrid composite structures consisting of 3 K 2 / 2 twill woven carbon fiber prepreg and Dyneema HB26 prepreg in a 0° / 90° / 0° / 90° arrangement. The composite layers have the dimensions of 190 mm x 175 mm. The total thickness of the composite structure in all samples is 10 mm. In addition, in this study, graphene nanoparticles were added to the polyurethane adhesive used to bond the ceramic and composite structures, and the effect of nanoparticle addition on the ballistic properties of the armors was investigated. According to ballistic test results, partial penetration was observed in all produced armor. The front ceramic layer caused bullet abrasion and a fungal effect. Analysis of the findings from ballistic test results of graphene nanoparticle-added armor revealed that the addition of graphene to the polyurethane adhesive resulted in an approximately 15% increase in the ballistic properties of alumina front-layer armor. The graphene nanoparticle-added polyurethane adhesive absorbed the residual kinetic energy from the ceramic armor, resulting in lower camber in the composite support layer. It was determined that the graphene nanoparticles added to the adhesive matrix increased the strength of the adhesive matrix material, acting as a composite layer within it and also providing better adhesion between the layers.

Keywords: Alumina, Carbon fiber, UHMWPE, Graphene

GİRİŞ

Balistik, bir merminin hedefe ulaşmak için silahtan (namludan) çıkışını, atış ortamındaki değişkenlere bağlı olarak hareketlerini, hedefi vurduktan sonraki enerji emilimini ve meydana gelen deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Son yıllarda hem sivil hem de askeri koruma açısından kişisel ve araç güvenliğinde kullanılan zırhların önemi artmaktadır. Balistik alanında mühimmat ile zırh alanındaki gelişmeler birbirine paralel ilerlemektedir. Silah teknolojisindeki gelişim, daha güçlü zırh malzemelerine yönelik araştırmaları da beraberinde getirmektedir. Balistik direnci yüksek zırhların yapısı tek katmanlı yapıdan çok katmanlı yapıya doğru evrilmiştir. Çok katmanlı zırhlarda mühimmatın sahip olduğu yüksek enerjiyi sönümlemeye yarayan bir seramik ön katman kullanılmaktadır. İlk basınç dalgası, seramik karonun arkasında çekme dalgası olarak yansıtılır ve kırılgan seramiğin parçalanmasına da neden olur (Louro & Meyers, 1989). Seramik malzemeler metal ve metal dışı bileşenlerden elde edilen inorganik metalik olmayan malzemelerdir. Yüksek sertliğe ve basınç dayanımına sahip seramikler, çeşitli mermi tehditlerini karşı günümüzün zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Balistik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan seramiklerin başında alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) gelmektedir. Seramik malzemelerin balistik özelliklerini belirleyen en önemli faktör üretim yöntemleridir. Seramikler basınçsız sinterleme,

sıcak presleme ve reaksiyonla bağlama teknikleri kullanılarak üretilir. Çok yüksek sıcaklıklarda sinterleme tekniği ile üretilen alümina seramikler homojen, ince taneli ve sert bir yapıya sahip olduğundan merminin zırhı delme eğilimine direnerek etkili koruma sağlar. Silisyum karbür, bor karbür ve silisyum nitrür alüminaya göre bazı üstün mekanik özelliklere sahip olsa da alümina seramikler hem malzeme hem de üretim maliyetlerinin daha düşük olması nedeniyle balistik uygulamalarda daha çok tercih edilen malzemelerdir.

Çok katmanlı zırhlarda ön katman olarak kullanılan seramiğin rolü yüksek sertliğe sahip çelik malzemeden yapılmış, hedefe yüksek hızlarla ulaşan mermileri köreltmek ve parçalamaktır (Guo vd.., 2021). Mühimmatın gücüne bağlı olarak mermi ve seramikten kopan parçalar, personelde ölümcül travmaya neden olabilecek yüksek enerjiye sahip olabilmektedirler. Bu nedenle, parçaların kinetik enerjisini daha da azaltmak için seramik karoya başka bir ikinci katman eklenmesi gerekmektedir (Tasdemirci vd., 2012). Bu amaçla, günümüzde çok katmanlı zırhta ön seramik karoyu desteklemek için UHMWPE, aramid, karbon fiber vb. kumaş katları yaygın olarak kullanılmaktadır (Lee vd., 2003). Son yıllarda literatürde balistik zırhlarda katmanlı yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır (Pereira vd., 2019; Oliveira vd., 2019; Reis vd., 2021).

Balistik uygulamalarda kullanım için en uygun malzemelerden biri çok iyi mekanik özelliklere sahip olan UHMWPE' dir. UHMWPE kumaşlar aramid, karbon ve cam elyaflara kıyasla daha yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahiplerdir (Marissen vd., 2005). UHMWPE' nin bu malzeme özellikleri, onları balistikte yaygın olan yüksek etkili enerji olaylarında kullanıma uygun hale getirir. Buna ek olarak, düşük hızlarda da yeterli darbe direnci ve sönümleme özellikleri gerektiren uygulamalar için de kullanılabilirler. Bununla birlikte UHMWPE kompozitlerinin de bazı dezavantajları mevcuttur. UHMWPE kompozitler düşük basma ve kesme mukavemetine sahiplerdir. (Peijs vd., 1990).

Karbon fiber (CF) takviyeli polimer kompozitler (CFRPC'ler), yüksek mukavemet ve yüksek sertlik gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı uçak, türbin, otomotiv ve havacılık endüstrileri dâhil birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek sertlik özelliklerine ek olarak, yüksek sönümleme özelliği, uzun hizmet ömrü, yüksek eğilme mukavemeti, iyi aşınma direnci ve darbe mukavemeti, korozyon ve yangına karşı direnç gibi çeşitli özelliklere de sahiptirler (Rani vd., 2021). Hibrit kompozit yapılar oluşturularak iki malzeme bileşeni ile yeni bir özellikte yapılar elde edilmektedir. Karbon fiber ve UHMWPE' den oluşan yeni hibrit yapı ile farklı kullanım alanlarına hitap eden dikkat çekici bir yapı oluşturulabilmektedir. Karbon fiber, UHMWPE' nin düşük basma ve kesme dayanımlarını büyük ölçüde tamamlayacak şekilde hem çekme hem de basma da yüksek özgül mukavemet ve sertliğe sahiptir. Böylelikle, balistik direnci yüksek, yapısal olarak sağlam bir kompozit yapı elde etmek için UHMWPE ve karbon fiber ile hibrit yapı oluşturmak mantıklıdır (Zulkifli vd., 2019).

Son zamanlarda grafen, yüksek elastisite modülü, mükemmel mukavemeti, iyi elektrik iletkenliği ve termal iletkenliği vb. üstün mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Literatürde araştırmacılar matris faza belirli miktarda grafen nanopartikül ilavesi ile kompozit yapının mekanik özelliklerini iyileştirme yoluna gitmişlerdir. Seramik katmanlara, fiber takviyeli kompozitlere ve seramik/kompozit yapıyı birleştirmede kullanılan

yapıştırıcı malzemeye grafen nanopartiküllerin eklenmesiyle zırhların balistik özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

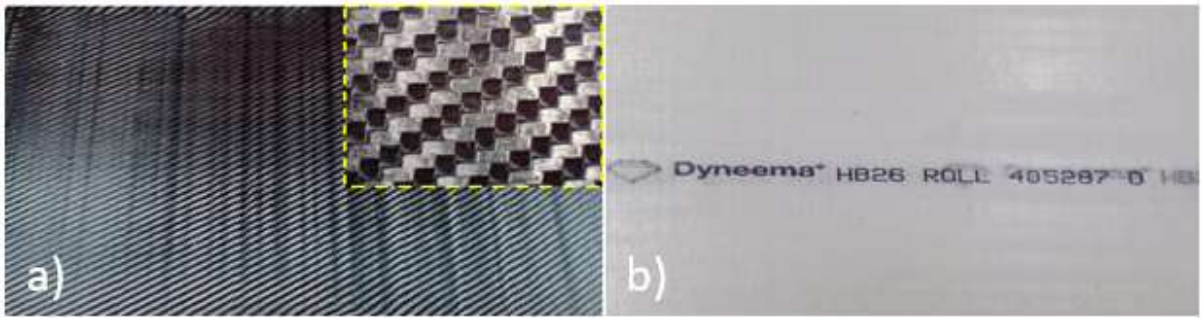
Bu çalışmada ön katmanı alümina seramikten destek katmanı karbon fiber ve UHMWPE' den oluşan çok katmanlı seramik/kompozit zırhların 7.62x63 M2 kalibre zırh delici mermilerin etkisi altındaki balistik performansını deneysel yöntemlerle incelenmiştir. NIJ Standard 01.01.06 Seviye-IV standartlarında 7.62x63 M2 kalibre zırh delici mermi ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nanopartikül katkısının zırhların balistik özelliklerine etkisini belirlemek için seramik ve kompozit tabakaları birleştirmede kullanılan poliüretan yapıştırıcıya grafen nanopartikül eklenerek nanopartikül katkısının zırhların balistik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda her konfigürasyon için ikişer test yapılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Deneysel çalışmalarda zırhın ön katmanını oluşturan seramik olarak alümina kullanılmıştır. Seramikler KİM İleri Malzemeler Sanayi ve Teknoloji A.Ş. (Kayseri)' den tedarik edilmiştir. Alümina seramikler 3.84 g/cm3 yoğunlukta, 12 mm kalınlıkta ve 100 mm x 100 mm ölçülerindedir. Alümina seramik karolara ait görsel Şekil 1' de verilmiştir. Çalışmada kullanılan 3 K 2/2 twill dokuma karbon fiber prepregler 245 gr/m^2 alan yoğunluğuna sahiptir. Karbon fiber' e ait görsel Şekil 2a' daverilmiştir. Karbon fiber prepreg Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. (İzmir)' den temin edilmiştir. UHMWPE olarak balistik uygulamalarda geniş kullanım alanına sahip Dyneema HB26 prepreg kullanılmıştır. Dyneema HB26 prepreg, bir poliüretan matris ile emdirilmiş, 0°/90°/0°/90° diziliminde tek yönlü fiberdir. Dyneema HB26' ya ait görsel Şekil 2b' de verilmiştir. Dyneema HB26 prepreg Garanti Giyim Kompozit Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Yozgat)' den tedarik edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan karbon fiber prepreglerin ve Dynema HB26 prepreglerin tek katman kalınlıkları sırasıyla 0.30 mm ve 0.32 mm' dir. Kompozit tabakalar 190 mm x 175 mm ölçülerindedir.



Şekil 1. Balistik testlerde kullanılan alümina seramik karolar.



Şekil 2. Prepreg a) 3K, 2x2 Twill Dokuma Karbon Fiber b) Dyneema HB26 UHMWPE.

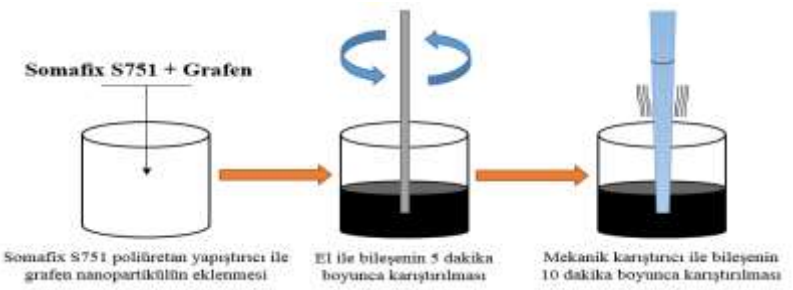
Seramik/kompozit zırhların üretimi Garanti Giyim Kompozit Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Yozgat) bünyesinde bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak karbon fiber ve UHMWPE prepregler kumaş kesme makinasında belirtilen ölçülerde kesilmiştir. Kesilen prepreg kumaşlar belirlenen sırada ve kalınlıkta istiflenmiştir. Presleme işleminden önce kompozit kumaşların altına ve üstüne ayırıcı film serilmiştir. Birinci aşamada Dyneema HB26 prepreg katlar 150 °C ve 60 bar basınç altında 75 dakika boyunca preslenmiştir. Preslemenin ikinci aşamasında Dyneema HB26 prepreg kompozit yapıya karbon fiber prepreg katlar eklenerek 20 dakika boyunca 126 °C ve 30 bar basınç altında presleme işlemi yapılmıştır. Presleme aşamasından sonra kompozitler istenilen ölçülere hızar makinesi kullanılarak getirilmiştir. Seramikler Somafix S752 poliüretan yapıştırıcı ile kompozitlerle birleştirilerek seramik/kompozit zırhlar oluşturulmuştur.

Nanopartikül katkısının balistik özelliklere etkisini araştırmak için yapıştırıcının içine grafen nanopartikül eklenmiştir. Grafen nanopartiküle ait tedarikçi firmadan alınan teknik özellikler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Grafen Nanopartiküle ait teknik özellikler (Nanografi, 2024).

Saflık	Kalınlık (nm)	Çap (µm)	Yüzey alan (m^2/g)	İletkenlik (s/m)	Renk
%99.9	5	30	170	1100-1600	Gri

Grafen nanopartikül, poliüretan yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %5 oranında ilave edilmiştir. Grafen nanopartikül ve yapıştırıcının birleşim sürecine ait görsel Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Grafen yapıştırıcı karışım adımları.

Seramik malzeme ile kompozit malzemeleri birleştirmek için grafen nanopartikül ve yapıştırıcıdan oluşan karışım seramik yüzeyin tamamını kaplayacak şekilde sürülmüştür. Şekil

4’ te katkısız ve nanopartikül katkılı yapıştırıcının seramik yüzeye sürülmesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 4. Seramik yüzeye katkısız ve grafen nanopartikül katkılı poliüretan yapıştırıcı sürülmesi.

Üretimin son aşamasında seramiklerin yüzeyine balistik test sonrası seramik parçalarının dağılmasını engellemek için cam elyaf kaplanmıştır. Balistik teste hazır hale gelen zırhın testleri yapılmış ve son olarak Roma Plastilina’ da meydana gelen girinti değerleri dijital kumpas ile ölçülmüştür. Zırhın üretim ve balistik test sürecine ait görsel Şekil 5’ te verilmiştir.

Balistik testler Garanti Giyim Kompozit Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Yozgat) bünyesinde TÜRKAK akreditasyonuna sahip balistik test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Mermiyi ateşlemek için bir silah namlusu kullanılmıştır. Mermi hızını ölçmek için hedefe 2.5 m mesafede yer alan merminin giriş ve çıkış hızlarının ölçüldüğü iki adet sensör kullanılmıştır. Zırh, Roma Plastilina destek plakasına sabitlenmiştir. Ayrıca, merminin seramik karonun merkezine doğru atılmasını sağlamak için lazer işaretçi kullanılmıştır.



Şekil 5. Zırhın üretim ve balistik test süreci.

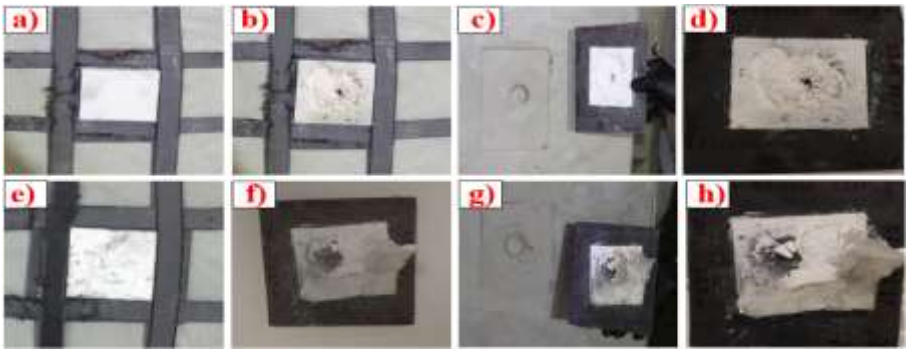
ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Deneysel çalışmada iki farklı zırh konfigürasyonunda her grup için 2'şer test yapılmıştır. $A_{12}C_1U_9$ numaralı zırhın ön katmanı 12 mm kalınlıkta alüminadan destek katmanı 1 mm kalınlıkta karbon fiber ve 9 mm kalınlıkta UHMWPE' den oluşmaktadır. $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyonunda alümina seramik ve kompozit yapıyı yapıştırmak için katkısız poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. G - $A_{12}C_1U_9$ numaralı zırhın ön katmanı 12 mm kalınlıkta alüminadan destek katmanı 1 mm kalınlıkta karbon fiber ve 9 mm kalınlıkta UHMWPE' den oluşmaktadır. G - $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyonunda alümina seramik ve kompozit yapıyı yapıştırmak için grafen nanopartikül - poliüretan karışımı yapıştırıcı kullanılmıştır. Balistik zırhların toplam kalınlık değerleri tüm numunelerde yaklaşık 22 mm'dir. Testte kullanılan numunelerin test numaraları, kalınlıkları ve kullanılan katman sayılarına ait bilgiler Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Alümina ön katmanlı zırh konfigürasyonları ve içerikleri.

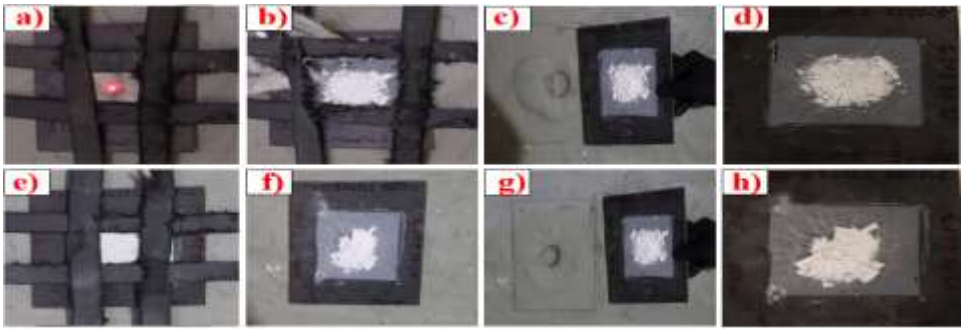
Test No	Ön katman	Kalınlık	Yapıştırıcı	Orta katman	Kalınlık	Son katman	Kalınlık
1	Al_2O_3	12 mm	Poliüretan	Karbon fiber	1 mm	UHMWPE	9 mm
2	Al_2O_3	12 mm	Poliüretan	Karbon fiber	1 mm	UHMWPE	9 mm
3	Al_2O_3	12 mm	Grafen + Poliüretan	Karbon fiber	1 mm	UHMWPE	9 mm
4	Al_2O_3	12 mm	Grafen + Poliüretan	Karbon fiber	1 mm	UHMWPE	9 mm

Şekil 6' da ön katmanı 12 mm kalınlıkta alüminadan destek katmanı 1 mm kalınlıkta karbon fiber ve 9 mm kalınlıkta UHMWPE' den oluşan $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyon numaralı zırh için balistik test adımları verilmiştir. İlk olarak Zırh, Roma Plastilina destek plakasına sabitlenmiştir (Şekil 6a ve Şekil 6e). Daha sonra lazer işaretçi yardımıyla mermi seramik karonun merkezine doğru atılmıştır (Şekil 6b ve Şekil 6f). Atışlar sonucunda Roma Plastilina kilinde girintiler meydana gelmiştir (Şekil 6c ve Şekil 6g). Zırhların balistik test sonrası görüntüleri Şekil 6d ve Şekil 6h' de verilmiştir. $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyon numaralı zırh için 2 adet test yapılmıştır. Atış öncesinde yapılan ölçüm sonucunda birinci test numunesi 827 g, ikinci test numunesi 847 g olarak ölçülmüştür. Birinci test numunesine mermi 876.55 m/s hızla, ikinci test numunesine 871.50 m/s hızla isabet etmiştir.



Şekil 6. $A_{12}C_1U_9$ kodlunumunelerin balistik test adımları (7.62 x 63 AP).

Şekil 7’ de ön katmanı 12 mm kalınlıkta alüminadan destek katmanı 1 mm kalınlıkta karbon fiber ve 9 mm kalınlıkta UHMWPE’ den oluşan G - $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyon numaralı zırh için balistik test adımları verilmiştir. Alümina seramik ile kompozit tabakaları birleştirmek için grafen nanopartikül katkılı poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Roma Plastilina destek plakasına sabitlenen zırhlara ait görüntüler Şekil 7a ve Şekil 7e’ de gösterilmiştir. Seramik karonun merkezi lazer işaretleyici ile belirlendikten sonra mermi ateşlenmiştir (Şekil 7b v e Şekil 7f). Atışlar sonucunda Roma Plastilina kilinde girintiler meydana gelmiştir (Şekil 7c ve Şekil 7g). Zırhların balistik test sonrası görüntüleri Şekil 7d ve Şekil 7h’ de verilmiştir. G - $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyon numaralı zırh için 2 adet test yapılmıştır. Atış öncesinde yapılan ölçüm sonucunda birinci test numunesi 843 g, ikinci test numunesi 830 g olarak ölçülmüştür. Birinci test numunesine mermi 883.80 m/s hızla, ikinci test numunesine 882.35 m/s hızla isabet etmiştir.



Şekil 7. G - $A_{12}C_1U_9$ kodlunumunelerin balistik test adımları (7.62 x 63 AP).

Her iki konfigürasyon için yapılan balistik testler sonucunda zırhların bağlı olduğu Roma Plastilina kilinde meydana gelen girinti değerleri dijital kumpas ile ölçülmüştür. $A_{12}C_1U_9$ ve G - $A_{12}C_1U_9$ konfigürasyon numaralı zırhlara yapılan balistik testlere ait sonuçlar Tablo 3’ te verilmiştir.

Tablo 3. Alümina ön katmanlı zırhların balistik test sonuçları.

NUMUNE	TEST NO	KÜTLE (g)	MERMİ İLK HIZ (m/s)	GİRİNTİ DEĞERİ (mm)	PENETRASYON (TAM / KISMİ)
$A_{12}C_1U_9$ - 1	1	827	876.55	24.36	KISMİ
$A_{12}C_1U_9$ - 2	2	847	871.50	19.29	KISMİ
G - $A_{12}C_1U_9$ - 1	3	843	883.80	16.37	KISMİ
G - $A_{12}C_1U_9$ - 2	4	830	882.35	18.09	KISMİ

SONUÇ

Bu çalışmada ön katmanı alümina seramikten, destek katmanı 1 mm kalınlıkta karbon fiber ve 9 mm kalınlıkta UHMWPE' den oluşan seramik/kompozit zırhlar üretilmiştir. Zırhların balistik özelliklerini belirlemek için NIJ 01.01.06 Seviye-IV standartlarında vücut zırhlarına atılan en üst seviye mermi olan 7.62 x 63 M2 (AP) ile testler yapılmıştır.

Son yıllarda nano teknolojinin gelişmesiyle birlikte nano malzemelerin üretimi ve kullanımı artmaya başlamıştır. Termoset veya termoplastik gibi polimerik malzemelere nano ölçekli maddelerin (örneğin nano kil, nanotüp, grafen vb.) eklenmesi ile üstün mekanik özellikte yapılar elde edilmektedir. Bu çalışmada seramik ve kompozit yapıyı birleştirmede kullanılan poliüretan yapıştırıcıya grafen nanopartikül eklenerek, nanopartikül katkısının zırhların balistik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Balistik test sonuçlarına göre üretilen tüm zırhlarda kısmi penetrasyon gözlemlenmiş olup zırhların hiçbiri delinmemiştir. Ön seramik katman merminin deformasyonuna neden olmuş, üzerinde mantarlaşma etkisi oluşmuştur. Uluslararası standartlara uygun vücut zırhı, yalnızca mermiyi durdurmakla kalmamalı, aynı zamanda arka yüz imzası (BFS) olarak bilinen Roma plastilina kilinde 44 mm' yi aşmayan girintili bir nüfuz derinliğini de önlemesi gerekir. Mevcut çalışmamızda üretilen bütün zırhlardaki girinti değerleri, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ölümcül künt travma sınırı (NIJ Balistik Standardı) olarak 44 mm'nin (1,73 inç) ve bazı Avrupa ülkeleri tarafından belirlenen (örn: Birleşik Krallık Polis Standardı) 25 mm' nin (0,98 inç) altında ölçülmüştür. Böylece üretilen tüm zırhların uluslararası standartlara uygun koruma sağladığı belirlenmiştir. Grafen nanopartikül katkısı ile zırhların balistik özelliklerinin iyileştiği de tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmadaki malzeme tedarik ve test olanaklarına sağladıkları destek için Garanti Kompozit Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ve KİM İleri Malzeme Sanayi ve Teknolojileri A.Ş.'ye teşekkürlerini sunarlar. Bu araştırma, FDK20221073 numaralı proje kapsamında Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından finanse edilmiştir.

KAYNAKÇA

de Oliveira Braga, F., Da Luz, F. S., Monteiro, S. N., & Lima Jr, É. P. (2018). Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. Journal of materials research and technology, 7(4), 554-560. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.019

Guo, G., Alam, S., Peel, L. D. (2021). An investigation of the effect of a Kevlar-29 composite cover layer on the penetration behavior of a ceramic armor system against 7.62 mm APM2 projectiles. International Journal of Impact Engineering. 157, 104000. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104000

Lee, Y. S., Wetzel, E. D., & Wagner, N. J. (2003). The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. Journal of materials science, 38(13), 2825-2833. https://doi.org/10.1023/A:1024424200221

Louro, L. H., & Meyers, M. A. (1989). Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics. Journal of Materials Science, 24(7), 2516-2532. https://doi.org/10.1007/BF01174523

Marissen, R., Smit, L., & Snijder, C. (2005). Dyneema fibers in composites, the addition of special mechanical functionalities. In Advancing with composites 2005, international meeting on composite materials (pp. 1-12). Centro Materiali Compositi, AMME-ASMECCANICA.

Nanografi. (2024, Mart 14). Grafen Nanoplatelet. Nanografi. https://shop.nanografi.com.tr/grafen-nanoplatelet-safl-k-99-9-boyut-5-nm-y-a-170-m2-g-cap-30-m/

Peijs, A. A. J. M., Catsman, P., Govaert, L. E., & Lemstra, P. J. (1990). Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibres Part 2: influence of composition and adhesion level of polyethylene fibres on mechanical properties. Composites, 21(6), 513-521. https://doi.org/10.1016/0010-4361(90)90424-U

Pereira, A. C., de Assis, F. S., da Costa Garcia Filho, F., Oliveira, M. S., da Cruz Demosthenes, L. C., Lopera, H. A. C., Monteiro, S. N. (2019). Ballistic performance of multilayered armor with intermediate polyester composite reinforced with fique natural fabric and fibers. Journal of Materials Research and Technology. 8(5), 4221-4226. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.031

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. Composites part B: engineering, 215, 108768. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108768

Reis, R. H. M., Nunes, L. F., da Luz, F. S., Candido, V. S., da Silva, A. C. R., Monteiro, S. N. (2021). Ballistic performance of guaruman fiber composites in multilayered armor system and as single target. Polymers. 13(8), 1203. https://doi.org/10.3390/polym13081203

Somakimya. (2024, Mart 14). Somafix Product Catolog. Somakimya. https://www.somakimya.com/uploads/gallery/211103104139-ingilizce-katalog.pdf

Tasdemirci, A., Tunusoglu, G., & Güden, M. (2012). The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering, 44, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.12.005

Zulkifli, F., Stolk, J., Heisserer, U., Yong, A. T. M., Li, Z., & Hu, X. M. (2019). Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMwPE ballistic hybrid composite panel. International Journal of Impact Engineering, 129, 119-127. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.02.

YERLİ KROMİT CEVHERİNDEN ALÜMİNOTERMİK REAKSİYONLA DÜŞÜK KARBONLU KROM ÜRETİMİ

Halil ŞAHAN
Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Kayseri-Türkiye
Erciyes Üniversitesi, Cateknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye,

Ali Rıza TÜRKMEN
Elmacı Madencilik A.Ş, Kayseri-Türkiye
Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye

Ömer DAYI
Elmacı Madencilik A.Ş, Kayseri-Türkiye

Özet

Savunma sanayiinde zırh çelikleri ve yüksek sıcaklık alaşımları gibi kritik uygulamalarda kullanılan saf krom metali, stratejik öneme sahip bir hammaddedir. Bu çalışmada, Elmacı Madencilik A.Ş. tarafından Kayseri, Pınarbaşı–bölgesinde üretilen yerli kromit cevheri kullanılarak alüminotermik yöntemle saf krom üretimi yöntemi araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, kromit cevheri, çevre dostu ve düşük sıcaklık hidrometalurjik yöntemle çözünürleştirilmiş ardından yüksek saflıkta yeşil krom (III) oksit –(Cr_2O_3) yüksek verimle elde edilmiştir. Bu proses sırası ile belli derişimlerde NaOH çözeltisi kullanılarak kontrollü oksijen atmosferi altında çözünürleştirme, hidrojen gazı kullanılarak indirgeme ve kalsinasyon adımlarını içermektedir. Bu yöntemle %90'ın üzerinde verimle Cr_2O_3 üretimi yapılmıştır.

İkinci aşamada yüksek saflıkta Cr_2O_3 kullanılarak kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (alüminotermik yöntem) düşük karbon içeriğine sahip krom metali üretimi yapılmıştır. Bu sentezde alüminyumun indirgeyici olarak kullanılmıştır. Bu aşamada dışarıdan enerji gerektirmeyen alüminotermik indirgeme yöntemi ile düşük karbonlu saf krom metali üretimine yönelik optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Yerli kromit cevheri kullanılarak geliştirilen bu yenilikçi düşük karbonlu krom üretim yöntemi ile elde edilen yeşil krom (III) oksit –(Cr_2O_3) ve metalik krom (Cr), Erciyes Üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Merkezi (TAUM)'inde bulunan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), X-ışınları toz kırınım cihazı (XRD) ve X-ışınları floresans spektrometresi (XRF) cihazları kullanılarak yapılan analizlerle karakterize edilmiştir. Analiz sonuçlarından hidrometalurjik yöntemle yükdek verimle saf Cr_2O_3 ve alüminotermik yöntemle Cr metali üretiminin yeterince yüksek verimle yapılabildiği bulunmuştur. Dışarıdan enerji gerektirmeyen ve kendiliğinden ilerleyen bir reaksiyonla gerçekleşen bu yöntemde, metalik kromun karbon içeriğinin düşük olması, üretim yöntem maliyetinin düşük ve çevre dostu olması gibi avantajları sayesinde savunma sanayiinde stratejik öneme sahip düşük karbonlu saf krom üretimi için yerli ve sürdürülebilir alternatif bir yöntem geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Krom Metali, Krom Oksit, Alüminotermik Reaksiyon, Hidrometalurji

Abstract

Pure chromium metal, which is used in critical applications such as armor steels and high-temperature alloys in the defense industry, is a raw material of strategic importance. In this study, a method for producing pure chromium using the aluminothermic process was investigated using locally produced chromite ore from Elmacı Madencilik A.Ş. in the Pınarbaşı region of Kayseri.

In the first phase of the study, the chromite ore was dissolved using an environmentally friendly and low-temperature hydrometallurgical method, followed by the high-efficiency production of high-purity green chromium (III) oxide (Cr_2O_3). This process involves dissolution under a controlled oxygen atmosphere using NaOH solution at specific concentrations, reduction using hydrogen gas, and calcination. This method achieved Cr_2O_3 production with an efficiency of over 90%.

In the second stage, high-purity Cr_2O_3 was used to produce low-carbon chromium metal through a self-propagating high-temperature synthesis (aluminothermic method). In this synthesis, aluminum was used as a reducing agent and sodium nitrate as a reaction-accelerating energy source. In this stage, optimization studies were conducted for the production of low-carbon pure chromium metal using the aluminothermic reduction method, which does not require external energy.

This innovative low-carbon chromium production method, developed using domestic chromite ore, yields green chromium (III) oxide (Cr_2O_3) and metallic chromium (Cr), which have been characterized using field emission scanning electron microscopy (FESEM), X-ray powder diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) devices. The analysis results showed that Cr_2O_3 can be produced with high yield using the hydrometallurgical method and Cr metal can be produced with sufficiently high yield using the aluminothermic method. In this method, which occurs through a self-sustaining reaction without requiring external energy, the low carbon content of metallic chromium, along with the low production costs and environmental friendliness of the method, have led to the development of a domestic and sustainable alternative method for producing low-carbon pure chromium, which is of strategic importance in the defense industry.

Keywords: Chromium Metal, Chromite Ore, Aluminothermic Reduction, Hydrometallurgy

1. Giriş

Türkiye, dünya kromit rezervleri bakımından önemli bir ülke konumundadır. Guleman (Elazığ), Sivas-Erzincan hattı ve Adana-Kayseri gibi bölgelerde yüksek tenörlü kromit yatakları bulunmaktadır [1]. Türkiye'de çıkarılan kromit cevherlerinin, benzer tenöre sahip diğer ülke cevherlerine kıyasla daha yüksek fiyatlarla alıcı bulmasının temel nedeni, bu cevherlerin metalürjik açıdan daha üstün özellikler taşımasıdır [2]. Özellikle Kayseri ili Pınarbaşı ilçesinde yer alan yüksek tenörlü sahalardan biri de Elmacı Madencilik A.Ş.'ye aittir ve bu sahadan elde edilen kromit cevheri bu çalışmada düşük karbonlu krom metali üretiminde hammadde olarak değerlendirilmiştir.

Krom metali (Cr) ise yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve korozyona karşı direnci sayesinde savunma sanayiinde stratejik öneme sahip bir alaşım elementidir. Özellikle zırh çelikleri, süperalaşımlar ve balistik koruyucu sistemler gibi uygulamalarda, yüksek performanslı malzeme gereksinimlerini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır [3]. Nitekim savunma sanayisinde kullanılan HS 188 gibi nikel bazlı süperalaşımlarda da, kromun oksidasyon direncine katkı sağladığı deneysel olarak gösterilmiştir [4]. Kromun bu teknik önemi, tarih boyunca jeopolitik düzeyde de yansımalarını bulmuştur. II. Dünya Savaşı sırasında krom, savaş teknolojilerinin temel hammaddesi olarak görülmüş; Türkiye, ABD ve Almanya gibi sanayileşmiş ülkeler için kritik bir tedarik kaynağı haline gelmiştir. Türkiye'nin tarafsız kaldığı bu dönemde, krom ihracatı üzerinden önemli siyasi ve ticari baskılara maruz kaldığı; hatta Meriç Nehri üzerindeki demiryolu köprülerinin bombalanmasının bile gündeme geldiği kaynaklarda bildirilmektedir [5]. Günümüzde de benzer şekilde, krom gibi stratejik öneme sahip madenlerin yerli kaynaklardan sürdürülebilir şekilde temini, yalnızca ekonomik değil aynı zamanda ulusal güvenlik açısından da kritik öneme sahiptir [6].

Geleneksel krom üretim yöntemleri yüksek enerji gereksinimi, karbon salımı ve pahalı ekipman ihtiyacı nedeniyle hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirlik açısından tartışmalıdır. Ayrıca elde edilen metal ürünlerde istenmeyen safsızlıklar ve karbon kalıntıları bulunabilmektedir. Savunma sanayii uygulamaları için gerekli olan yüksek saflıkta ve düşük karbon içerikli krom üretimi açısından bu yöntemler sınırlayıcıdır.

Bu çalışmada, Elmacı Madencilik A.Ş. tarafından çıkarılan yerli kromit cevheri, TÜBİTAK 1507 destekli proje kapsamında çevre dostu bir hidrometalurjik işlemle Cr_2O_3 bileşiği üretlmiş ve bu ürün alüminotermik yöntemle indirgenerek düşük karbonlu saf krom metal üretimine yönelik optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu yöntemde, alüminyum metali indirgeme ajanı olarak kullanılmıştır. Geliştirilen bu yöntem; dış enerji kaynağına ihtiyaç duymaması, kendiliğinden ilerlermesi, düşük karbon içermesi ve çevre dostu yapısıyla savunma sanayii için stratejik öneme sahip krom üretiminde yerli ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

2. Materyaller ve Yöntemler

Klasik alüminotermik yöntem; kromit cevheri, alüminyum tozu ile indirgenerek gerçekleştirilir. Belli oranlarda Al, Yükseltgeyici-1 ve Cr2O3 içeren karışım dışardan tetikleme ile tutuşturulduğunda kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık reaksiyonunun enerjileri sayesinde metalik kromun oluşması için gerekli enerjiyi sağlamaktadır. (Gasik, 2013) [7].

Kromit oksidin indirgenmesi, alüminotermik bir sürecin tüm temel özelliklerini taşır; bunlara enerji gereksinimleri ve nihai ürün saflığının başlangıçta kullanılan reaktiflerin saflığına

doğrudan bağlı olması da dahildir. Ana reaksiyonlar ve termodinamik veriler aşağıda verilmiştir.

$Cr_2O_3+2Al \rightarrow 2Cr+Al_2O_3$ ΔH_{298}=-548.6 kJ Specific Heat=-2663.5 J/g

$Fe_2O_3+2Al \rightarrow 2Fe+Al_2O_3$ ΔH_{298}=-849.9 kJ Specific Heat=-3977.9 J/g

$3/2SiO_2+2Al \rightarrow 3/2Si+Al_2O_3$ ΔH_{298}=-319.7 kJ Specific Heat=-2148.9 J/g

$Cr_2O_3 + Fe_2O_3 + 3/2SiO_2+6Al \rightarrow 2Cr + 2Fe + 3/2Si+3Al_2O_3$

ΔH_{298}=-1718.1 kJ Specific Heat=-3047.2 J/g

[8]

2.1. Kromit Cevheri ve Reaktifler

Bu çalışmada kullanılan kromit cevheri, Kayseri/Pınarbaşı'ndaki Elmacı Madencilik A.Ş.' ye ait cevher zenginleştirme tesisinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflık derecesindedir. Deiyonize su, laboratuvar tipi su saflaştırma sistemi ile elde edilmiştir.

2.2. Karakterizasyon Teknikleri

Kromit cevheri, krom (III) oksit ara ürünü ve metalik krom örnekleri, Malvern Panalytical marka Emperian model X-ışını difraktometresi (XRD) ile analiz edilmiştir. Numuneler, Cu-Kα radyasyonu kullanılarak 2θ açısı 10 ila 90° aralığında taranmıştır. Elde edilen XRD desenlerinin faz tanımlamaları için X'Pert High-Score Plus veri tabanı yazılımı kullanılmıştır. Tozların morfolojisinin incelenmesi için enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ile donatılmış Zeiss EVO model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Katı numunelerin kimyasal bileşiminin analizinde X-ışını floresans spektroskopisi (XRF, Malvern Panalytical, Epsilon 1) kullanılmıştır. Partikül boyutu dağılımı analizi ise Malvern Master-sizer cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1' de bu cihazlara ait görseller yer almaktadır.



Şekil 1. Karakterizasyon Teknikleri İçin Kullanılan Cihazlar

2.3. Yeşil Kromoksit (Cr_2O_3) Üretim Süreci

Bu çalışmada ara ürün olarak kullanılan yeşil krom oksit (Cr2O3), çevre dostu bir hidrometalurjik yöntemle üretilmiştir. Üretim süreci 2 aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamalar sırasıyla basınçlı oksidatif liç yöntemi ve hidrojen gazı kullanarak hidrotermal yöntemle Cr2O3 sentezi aşamalarıdır.

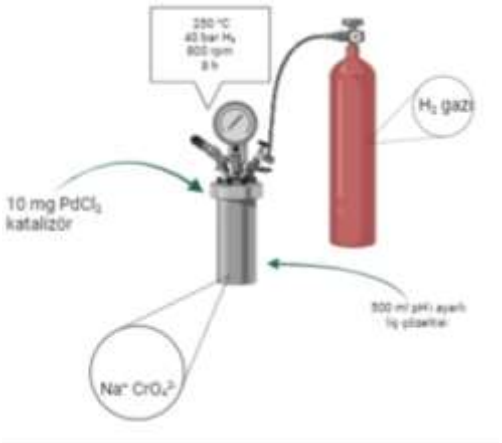
Cevherin çözünür forma dönüştürülmesinde, 20 L hacme sahip paslanmaz çelikten imal edilmiş bir basınçlı reaktör kullanılmıştır. Elmacı Madencilik A.Ş.'den temin edilen ve 40–100 μm aralığında partikül boyutuna sahip kromit cevheri, NaOH çözeltisi ve deiyonize su ile belirli oranlarda karıştırılarak reaktöre alınmıştır [9]. Reaktör sıcaklığı ±2 °C hassasiyetle kontrol edilerek, belirlenen sıcaklığa ulaşıldığında reaktöre O_2 gazı verilmiş ve reaksiyon ortamında hem yüksek basınç hem de zengin oksijen koşulları sağlanmıştır. Reaksiyon süresince O_2 basıncı ±0,2 bar hassasiyetle sabit tutulmuştur.

Reaksiyonun ardından sistem hava ile inert hale getirilmiş ve liç bulamacı soğutularak katı-sıvı faz ayrımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen liç çözeltisindeki Cr miktarı titrimetrik analiz, AAS veya ICP yöntemleriyle tayin edilmiştir. Liç verimi aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmıştır:

$$\%\mathrm{Cr} = \left(\frac{[\mathrm{Cr}]_r \times V_r}{m_0} \right) \times 100 \quad [10]$$

Burada [Cr]r: liç çözeltisindeki krom konsantrasyonu (g/L), Vr: çözeltinin hacmi (L), m_0: kullanılan kromit cevherindeki toplam krom miktarıdır (g).

Basınçlı çözünürleştirme sonrası elde edilen Cr(VI) iyonları içeren çözeltide, hidrojen gazı (H_2) kullanılarak indirgeme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Bu adımda Cr(VI) iyonları, Cr(III) iyonlarına indirgenmiş ve $CrOOH/Cr(OH)_3$ bileşikleri çöktürülerek ortamdan ayrılmıştır. Oluşan çökelek filtrelenmiş, kurutulmuş ve analizlere tabi tutulmuştur.



Şekil 2. H_2 gazı ile hidrotermal yöntemle Cr_2O_3 sentez yönteminin şematik gösterimi

Çözeltideki Cr(III) miktarı AAS, ICP veya titrimetrik yöntemle, indirgenmemiş Cr(VI) kalıntısı ise spektrofotometrik veya ICP-MS-MS yöntemiyle analiz edilmiştir.

Filtrasyon ve kurutma işlemlerinden elde edilen $Cr(OH)_3$ veya CrOOH ürünleri 500 °C üzerindeki sıcaklıklarda kontrollü kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kalsinasyon sonucunda yüksek verimle saf yeşil renkli Cr_2O_3 ürünü elde edilmiştir. Nihai ürünün saflığı XRF analiziyle, yapısal faz dağılımı ise XRD ile belirlenmiştir.

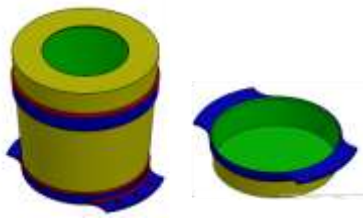
2.4. Alüminotermik İndirgeme Yöntemiyle Düşük Karbonlu Krom Üretimi

Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) yöntemiyle, Elmacı Madencilik A.Ş.'ye ait Kayseri/Pınarbaşı-Demircili maden sahasından elde edilen cevherin çevre dostu bir hidrometalurjik yöntemle işlenmesi sonucu sentezlenen %99 saflıktaki yeşil krom oksit (Cr_2O_3) kullanılarak, düşük karbonlu krom metali üretimine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında farklı başlangıç kimyasal madde oranlarındaki karışımları ve indirgeyici olarak metalik toz alüminyumun kullanıldığı kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık (alüminotermik) yöntem ile düşük karbonlu krom metali üretim mekanizması incelenmiştir.

Bu amaçla projede aşağıdaki özellikte bir pota kullanılmıştır.

1- Alüminotermik reaksiyonun gerçekleşeceği potan aşağıda görülmektedir. Alt taban ve üst kısım olmak üzere iki parçadan oluşan potanın dışı 5 mm çelik sac; iç kısmı ise magnezit refrakterden yaptırılmıştır. Reaksiyon potasının boyutları yaklaşık 500 mm boy, 450 mm dış çap olacak şekilde planlanmıştır (şekil 3).



Şekil 3. Reaksiyon Potası

Her deneyde, krom oksit uygun katkılarla iyice karıştırılarak reaktöre yüklenmiştir. Kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklıklı sentez reaksiyonları için temel işlem parametresi olan spesifik ısıyı sağlamak amacıyla yükseltgeyici ve alüminyum tozu karışımı ilave edilmiştir. Yöntem adımları Şekil 4'de verilmiştir.



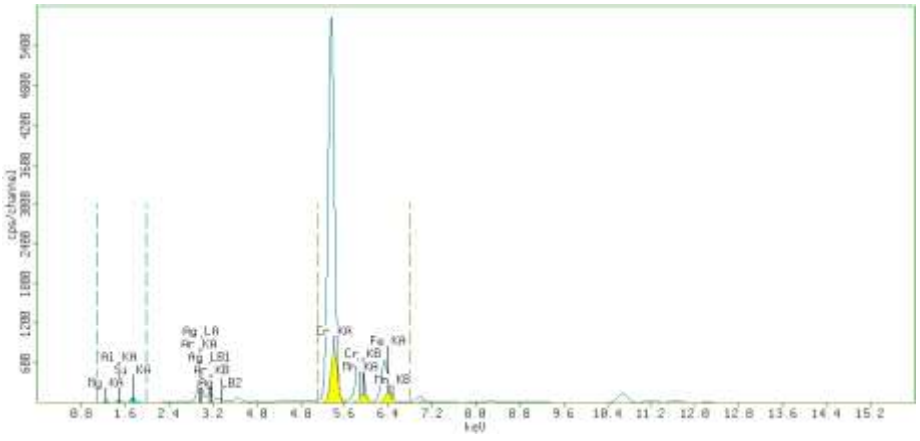
Şekil 4. Düşük Karbonlu Krom Metali ÜretimininYöntem Akış Şeması

Reaksiyonu başlatmak için magnezyum şeridi ve magnezyum tozu kullanılmıştır. Alüminyum tozu indirgen madde olarak görev yapmıştır. Reaksiyon başladıktan sonra reaksiyon kendiliğinden devam etmiştir. Her bir ısıtma çevriminde reaksiyon süresi yaklaşık 90–120 saniye sürmüştür. Reaksiyon ürünleri oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmış, ardından reaktör boşaltılmış ve elde edilen metal ile cüruf tartılmıştır. Alaşım ve cürufun kimyasal bileşimlerini belirlemek üzere temsili numuneler seçilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kromit Cevherinin Karakterizasyonu

Kromit cevherinin X-ışını floresans (XRF) spektrumu Şekil 5' da verilmiştir. Cevherin kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir. Krom içeriği %56,52 ağırlıkça olarak tespit edilmiştir.

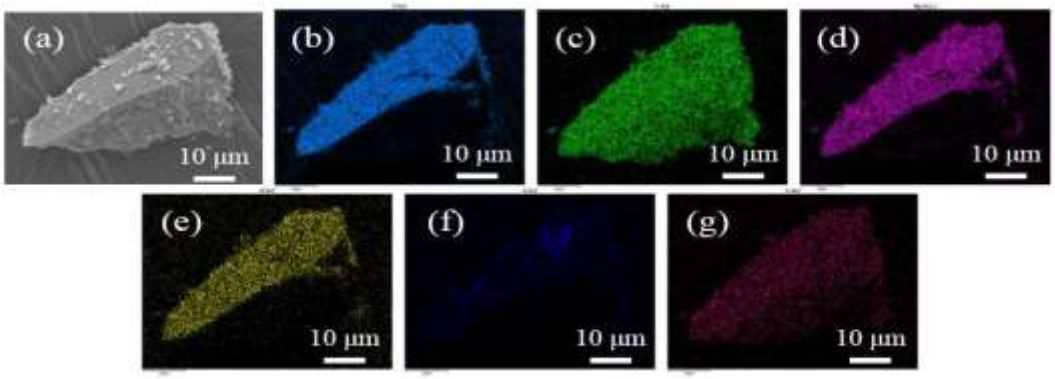


Şekil 5. Kromit cevherinin X-ışını floresans (XRF) spektrumu

Tablo 1. Kromit cevherinin kimyasal bileşimi

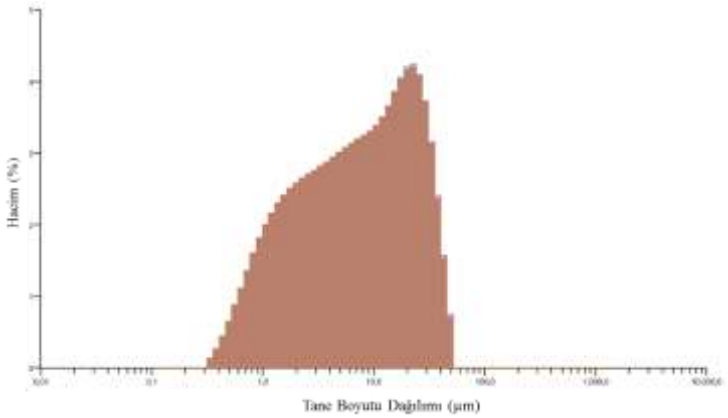
Bileşen	Cr_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	CaO	NiO	TiO_2
%	56.52	10.81	3.67	14.57	14.01	-	0.137	0.187	0.128

X-ışını difraksiyon (XRD) desenine göre (Şekil 5'da gösterildiği üzere), kromit cevherinin ana kristal fazı (Mg, Fe)(Cr, Al)$_2$O$_4$ olup; ikincil faz olarak (Mg, Fe, Al)$_6$(Si, Cr)$_4$O$_{10}$(OH)$_8$ belirlenmiştir. Kromit cevherinin morfolojisi ve element dağılımı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Şekil 6(a)'da verilen sekonder elektron görüntüsüne göre, kromit cevheri tanesi kompakt yapıdadır ve yüzeyi pürüzlüdür. Şekil 6(b)-(g)'de ise enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDX) ile elde edilen element haritalamasında, Cr, Mg, Fe ve Al elementlerinin cevher içerisinde homojen şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Sekonder elektron görüntüsü (a) ve kromit cevherine ait element haritalamaları (b: O, c: Cr, d: Mg, e: Al, f: Si, g: Fe)

Cevher, içerisinde iri taneler barındırdığı için hidrometalurjik proses için öğütülmüştür. Bu işlemde 100 g cevher halkalı değirmende 1 saat süre ile 30 dakika aralıklarla 10kx devirde öğütüldü. Öğütülen cevherin tane boyutu analizi Mastersizer cihazı ile yapıldı. Tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 7'da görülmektedir.



Şekil 7. 1 saat 10KX devirde öğütülmüş cevhere ait tane boyutu dağılım eğrisi

Tablo 2'de ise kümülatif tanecik boyutu dağılım bilgileri verilmektedir. Tablo 2'den de görüldüğü gibi cevher tane boyutunun büyük oranda 179 µm veya daha büyük olduğu

görülmektedir. Öğütmeden sonra ise cevher tane boyutunun ortalama 52 µm olduğu bulunmuştur.

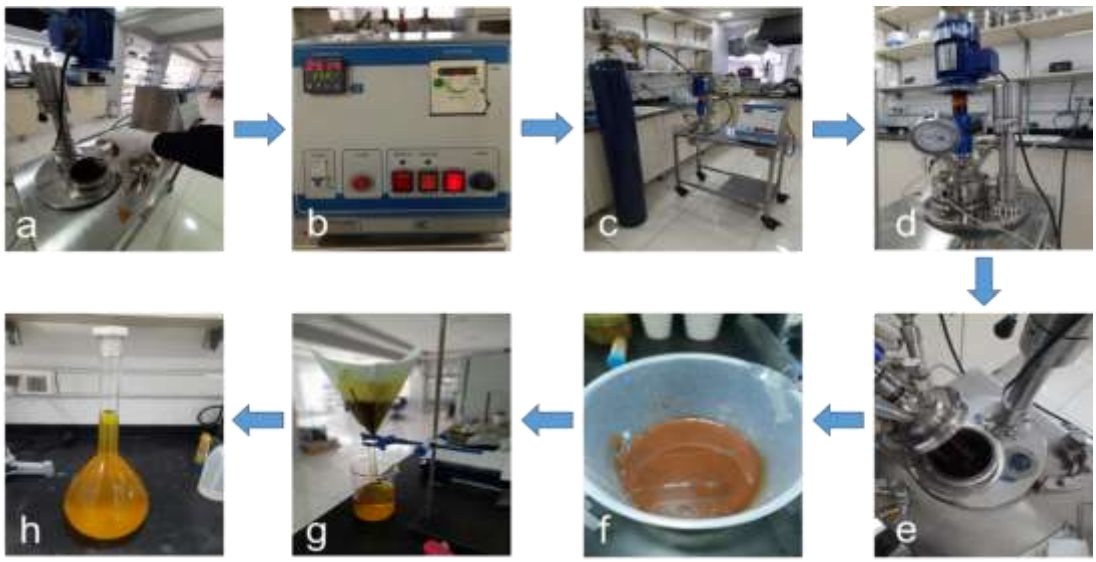
Tablo 2. Tüvenan ve öğütülmüş cevherin tane boyutu dağılım verileri

	DX 10 (µm)	**Dx 50 (µm)**	**Dx 90 (µm)**	**Dx 99 (µm)**	**Dx 100 (µm)**
Kromit cevheri (Tüvenan)	4.37	38.0	179	358	555
Öğütülmüş kromit cevheri	1.11	7.26	28.6	44.5	51.8

3.2. Yeşil Krom(III) oksit (Cr_2O_3) Üretimi

3.2.1. Basınçlı Oksidatif Liç Yönteminin Optimizasyonu

Bu projede yeşil Cr_2O_3 eldesi için başlangıç maddesi olan kromit cevherinin çözünmesi işleminde basınçlı oksidatif liç yöntemi kullanılmıştır. Yöntemde NaOH çözeltisi çözücü olarak, oksijen gazı ise yükseltgeyici ve pozitif basınç sağlayıcı olarak kullanılmıştır. Yöntemin optimizasyon çalışmasında ağırlıkça NaOH/cevher oranı, NaOH konsantrasyonu, O_2 gazının kısmi basıncı ve reaksiyon sıcaklık parametreleri belirlenmiştir. Bunun için Zhang ve Xu Hindistan kromitine uyguladığı basınçlı liç yöntemi [11] Elmacı Madencilik Demircili işletmesi kromit cevheri için tekrarlanarak optimize edilmiştir. Zhang ve arkadaşlarının Hindistan kromitine uyguladığı basınçlı liç yöntemine göre diğer parametreler optimum şartlarda olduğunda 200 ° C'den fazla reaksiyon sıcaklığı ve 3 saatten daha fazla reaksiyon süresinde oksidatif basınçlı liç yönteminde kromit cevherinin çözünürlüğünün %90'nın üzerinde olduğu bulunmuştur [11]. Bu yüzden optimizasyon çalışmalarında diğer parametrelerin etkisini incelemek için reaksiyon sıcaklığı 250° C, reaksiyon süresi ise 5 saat olarak uygulanmıştır. Şekil 8' de basınçlı oksidatif liç yönteminin deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 8. Basınçlı oksidatif liç yönteminin adımları a. Reaksiyon kabına kromit cevheri ve NaOH'in ilavesi, b. Sıcaklığın 250°C' a ayarlanması, c. O_2 gazının reaktöre verilmesi, d. Reaktör basıncının ayarlanması, e.Reaksiyon kabının soğuduktan sonra açılması, f. Reaksiyon ürünlerinin behere alınması, g.Basınçlı liç yöntemi katı kalıntı (BLYKK) ve basınçlı liç çözeltisinin süzülerek ayrılması ve BLYKK'nın yıkanması h.Basınçlı liç çözeltisinin son hacme tamamlanması

3.2.1.1.NaOH/Cevher Oranının Kromit Cevheri Çözünme Verimine Etkisi

Bu çalışmada 64 bar O_2 kısmi basıncı, ağırlıkça %34,2 NaOH konsantrasyonu, 250°C reaksiyon sıcaklığı, 650 rpm reaktör karıştırma hızı ve 5 saat reaksiyon süresi sabit tutularak ağırlıkça NaOH/ cevher oranının kromit cevheri çözünmesine etkisi incelenmiştir. Liç çözeltisine geçen Cr miktarları ekte verilen titrimetrik yöntemle hesaplanmıştır. Ağırlıkça NaOH/cevher oranı 4 olduğunda çözünme verimi %66.7 iken; aynı şartlarda ağırlıkça NaOH/cevher oranı 5 olduğunda çözünme verimi %49.4 olarak hesaplanmıştır. Bu deneylere göre NaOH/cevher oranının ağırlıkça 4 olması gerektiği, NaOH/cevher ağırlıkça oran artışının çözünme verimini olumsuz etkilediği bulunmuştur. Bu iki deneyde çözünme verimlerinin %90'dan az olması NaOH/cevher oranı artsa da ağırlıkça %34 olan NaOH miktarının yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

3.2.1.2.NaOH Konsantrasyonun Kromit Cevheri Çözünme Verimine Etkisi

Bu çalışmada 64 bar O_2 kısmi basıncı, 250° C reaksiyon sıcaklığı, 650 rpm reaktör karıştırma hızı, 5 saat reaksiyon süresi ve NaOH/ cevher oranı 4 sabit tutularak NaOH konsantrasyonunun kromit cevheri çözünmesine etkisi incelenmiştir. Bu deneylerde NaOH konsantrasyonları sırası ile %55, % 58.5 ve % 61 olarak belirlenmiştir. Aynı şartlarda yapılan deneylerde liç çözeltisine geçen Cr miktrarları ekte verilen titrimetrik yöntemle hesaplanmıştır ve çözünme verimleri sırası ile % 85.2, %96.9 ve % 92.7 olarak hesaplanmıştır. Çözünme verim değerleri tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Basınçlı liç çözeltisindeki NaOH konsantrasyonuna göre kromit cevheri çözünme verimleri

NaOH konsantrasyonu (%)	**Çözünme verimi (%)**
55.0	80.8
58.5	96.9
61.0	92.7

Aynı şartlarda yapılan deneyler sonucunda % NaOH konsantrasyonu % 55'den büyük olduğunda kromit cevherinin basınçlı liç yöntemi ile çözünme verimlerinin %90'dan büyük olduğu bulunmuştur. Ayrıca NaOH optimum konsantrasyonun ise %58.5 olması gerektiği bulunmuştur. NaOH miktarının limit bir değerden büyük olması çözelti viskozitesinin artmasına ve oksijen geçirgenliğinin azalmasına yani O_2'nin NaOH çözeltisindeki çözünürlüğünün ve kütle transferinin azalmasına sebep olmaktadır. Sonuçta %NaOH konsantrasyonu 58.5 den 61' e artırıldığında kromit cevherinin çözünürlüğü düşmekte ve çözünme verimini azalmaktadır. Xu ve arkadaşları ile Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuştur [11,12].

3.2.1.3.Oksijen Kısmi Basıncının Kromit Cevheri Çözünme Verimine Etkisi

Bu çalışmada 250°C reaksiyon sıcaklığı, 650 rpm reaktör karıştırma hızı, 5 saat reaksiyon süresi, ağırlıkça NaOH/cevher oranı 4 ve %58.5 NaOH konsantrasyonu sabit tutularak oksijen kısmi basıncının kromit cevheri çözünmesine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla oksijen kısmi basınçları 16, 32, 48 ve 64 bar olacak şekilde sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Aynı şartlarda yapılan deneylerde liç çözeltisine geçen Cr miktarları ekte verilen titrimetrik yöntemle hesaplanmıştır ve çözünme verimleri sırası ile %46.1, %71.1 ,%74.8 ve % 96.9 olarak hesaplanmıştır. Çözünme verim değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Oksijen kısmi basıncına göre kromit cevheri çözünme verimleri

Oksijen kısmi basıncı (bar)	Çözünme verimi (%)
16	46.1
32	71.1
48	74.8
64	96.9

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuştur [11,12]. Konsantre NaOH sulu çözeltisinde aşağıdaki asit baz denge reaksiyonun oluştuğu Duan ve Qiao tarafından verilmiştir [13].

$2OH^- \rightarrow H_2O + O^{2-}$

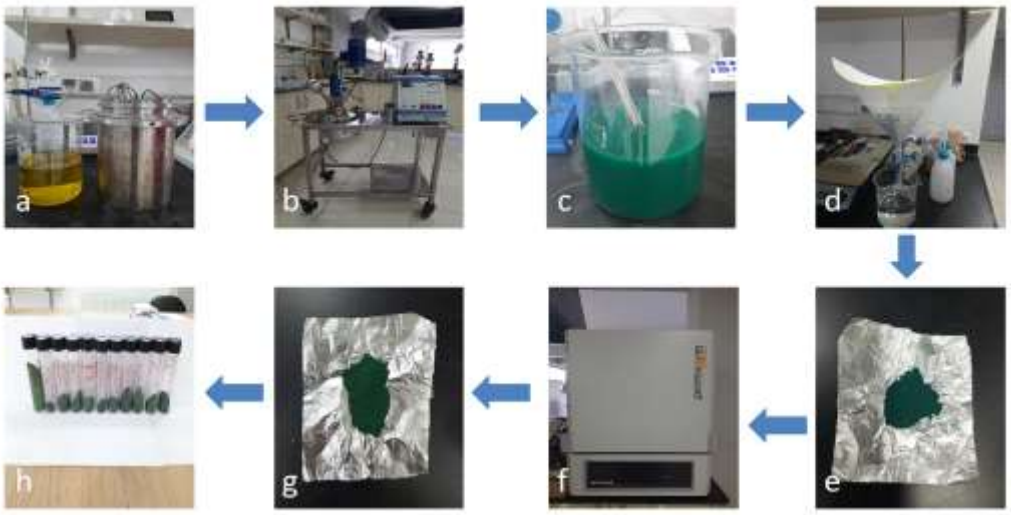
Çözünürlük dengesi ise Sun ve arkadaşları tarafından aşağıdaki reaksiyonla açıklanmıştır [14].

$1/2O_2 + O^{2-} \rightarrow O_2^{2-}$

Reaksiyonda görüldüğü gibi liç çözeltisindeki türlerin oksidasyonu (yükseltgenmesi) O_2 gazının miktarı ile artmaktadır. O_2 gazının kısmi basıncının artması ile denge reaksiyonuna göre O_2^{2-} anyonlarının konsantrasyonu artacaktır. O_2^{2-} anyonları ise cevherin ayrışarak ortamda bulunan katyonik türlerin yükseltgenmesini sağlamaktadır. Bu yüzden O_2 gazının kısmi basıncı artışı ile kromit cevherinin ayrışıp çözünürlüğü artmaktadır.

3.2.2. Hidrojen Gazı Kullanarak Hidrotermal Yöntemle Cr_2O_3 Sentezi

Bu çalışmada liç çözeltisine çözünerek geçen kromat (CrO_4^{2-}) iyonlarından yüksek verimle Cr_2O_3 sentezlenmesi araştırıldı. Bu amaçla indirgeyici madde olarak hidrojen gazı, yöntem olarak ise hidrotermal yöntem kullanıldı. Yöntemin optimizasyonunda sırası ile pH, sıcaklık ve katalizörün etkisi araştırıldı. Katalizör olarak $PdCl_2$ ve $PtCl_2$ kullanıldı. Hidrotermal yöntemle ortamda bulunan Cr^{6+} yükseltgenme basamağındaki iyonlarının yüksek verimle Cr^{3+} iyonlarına indirgenmesi ardından da hidroksitleri veya oksihidroksitleri şeklinde ortamdan çökerek ayrılmaları amaçlandı. Çökelek 100 °C' da 10 saat kurutulduktan sonra ise açık havada 900 °C' de, 2 saat ısıtılarak Cr_2O_3 ürünün eldesi amaçlandı. Hidroksitli ara ürün ve son ürün olan Cr_2O_3 XRD, FESEM ve DTA-TG analizleri yapıldı. Şekil 9' da hidrojen gazı kullanarak hidrotermal yöntemle Cr_2O_3 sentezinin deney aşamaları görülmektedir.



Şekil 9. Basınçlı oksidatif liç çözeltisinden indirgeme reaksiyonu ile Cr_2O_3 üretim aşamaları a. Liç çözeltisinin reaksiyon kabına alınması b. H_2 gazı ile indirgeme reaksiyonunun gerçekleştirilmesi c.Reaksiyon sonucunda elde edilen $Cr(OH)_3$ lu çözelti d. $Cr(OH)_3$ içerikli çözeltinin süzülerek çökeleğin çözeltiden ayrılması e. $Cr(OH)_3$ f. 900 °C de $Cr(OH)_3$ ün yakılması g. Cr_2O_3 h. Deneyler sonucunda elde edilen Cr_2O_3 ürünleri

3.2.2.1.pH'ın Cr_2O_3 Oluşum Verimine Etkisi

Optimizasyon çalışmasında 40 bar H_2 kısmi basıncı, liç çözelti pH'ı 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 10 mg $PdCl_2$ katalizör, 8 saat reaksiyon süresi sabit tutuldu.

Tablo 5. Reaksiyon sıcaklığının Cr_2O_3 oluşum verimine etkisi

Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	**500 mL liç çözeltisindeki Cr_2O_3 miktarı (g)***	**Oluşan çökelek miktarı (g)**	**900 °C 2 saat sıstma sonrası oluşan Cr_2O_3 miktarı (g)**	**Cr_2O_3 oluşum verimi (%)**
200	2.55	0.95	0.76	29.8
250	2.70	3.30	2.63	97.4

*Titrasyonla bulunmuştur.

Tablo 5'de görüldüğü gibi reaksiyon sıcaklığı 250 °C olduğunda Cr_2O_3 oluşum verimi %100' e yaklaşmaktadır. Bu deneyler sonunda optimum reaksiyon sıcaklığının 250 °C olması gerektiği bulunmuştur.

3.2.2.2.Katalizörün Cr_2O_3 Oluşum Verimine Etkisi

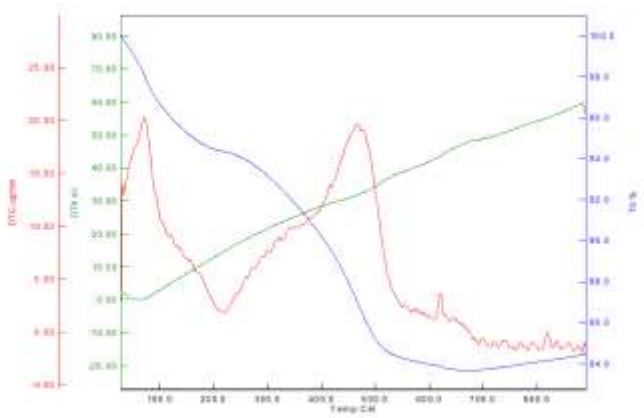
Optimizasyon çalışmasında 40 bar H_2 kısmi basıncı, liç çözelti pH'ı 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 8 saat reaksiyon süresi ve 250 °C reaksiyon sıcaklığı sabit tutuldu. Katalizör olarak $PdCl_2$ ve $PtCl_2$ kullanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 6'da görülmektedir.

Tablo 6. Katalizörün Cr_2O_3 oluşum verimine etkisi

Katalizör	500 mL liç çözeltisindeki Cr_2O_3 miktarı (g)*	Oluşan çökelek miktarı (g)	900 °C 2 saat sıstma sonrası oluşan Cr_2O_3 miktarı (g)	Cr_2O_3 oluşum verimi (%)
Katalizör kullanılmadı	2.62	1.09	0.86	32.8
10 mg $PdCl_2$	2.70	3.30	2.63	97.4
10 mg $PtCl_2$	2.91	0.39	0.31	10.7

*Titrasyonla bulunmuştur.

Tablo 6' da görüldüğü gibi 10 mg $PdCl_2$ katalizör olarak kullanıldığında Cr_2O_3 oluşum verimi %100' e yaklaşmaktadır. Bu deneyler sonunda 10 mg $PdCl_2$ katalizör kullanılması gerektiği, katalizör kullanılmadığı veya $PtCl_2$ katalizör olarak kullanıldığında Cr_2O_3 oluşum veriminin düştüğü görülmektedir.

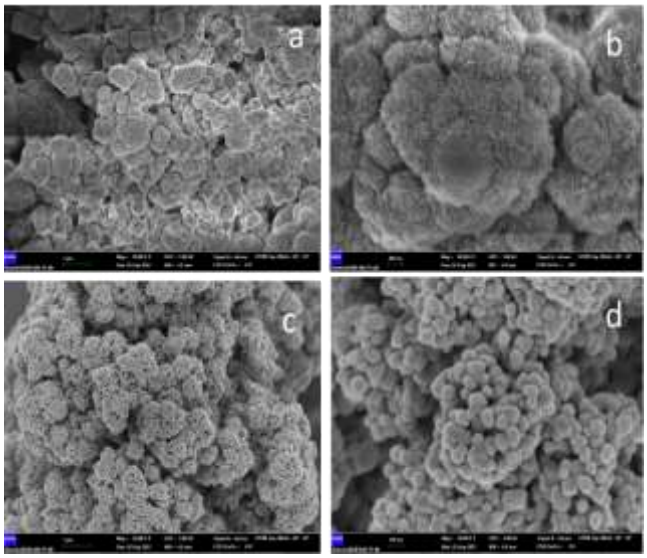


Şekil 10. 40 bar H_2 kısmi basıncı, pH 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 10 mg $PdCl_2$ katalizör, 8 saat reaksiyon süresinde oluşan hidroksitli ara ürünün DTA/TG eğrisi

Şekil 10' da ki DTA/TG eğrisinde görüldüğü gibi yaklaşık 100 °C' ye kadar olan kütle kayıpları adsorbe olan suyun uzaklaşması ile ilgilidir. 400 ile 500 °C arasındaki kütle kayıpları ise hidroksitli yapıdan faz dönüşümü sonrası oksitli yapıya geçişi gösterir. TG analizine göre % kütle kaybı %15.38 olarak bulunmuştur.

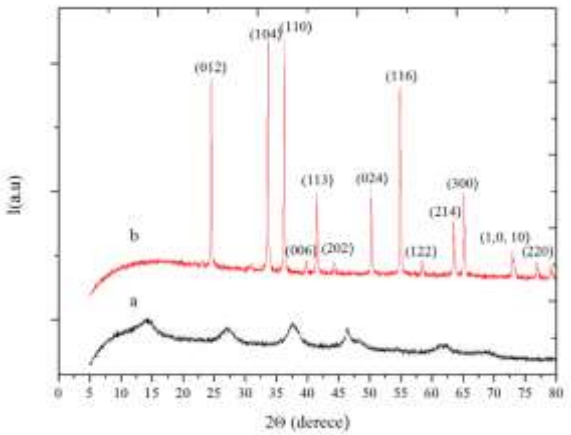
Şekil 11'de hidroksitli ara ürün ve 900 °C'de 2 saat ısıtma ile sentezlenmiş Cr_2O_3'e ait FESEM görüntüleri verilmiştir. FESEM görüntülerine göre hidroksit ara ürünün nano yapraklardan oluşan taneler içerdiği, tanelerin topakalaştığı ve yapının amorf olduğu anlaşılmaktadır. Şekil

11’c ve d’de verilen FESEM görüntülerine göre Cr_2O_3 tane dağılımının homojen olduğu ve tane büyüklüğünün ise yaklaşık 100 nm olduğu görülmektedir.

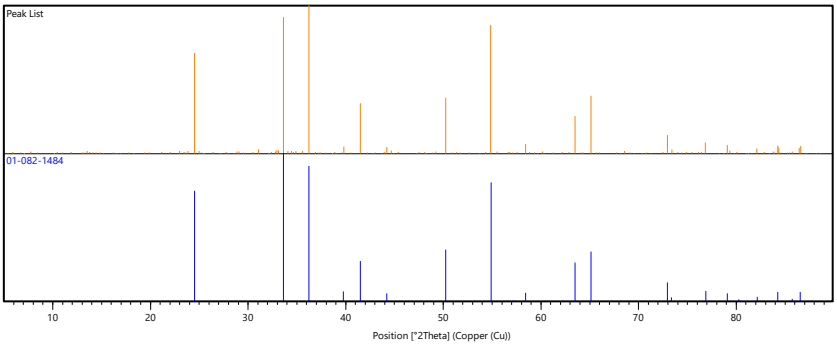


Şekil 11. 40 bar H_2 kısmi basıncı, pH 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 10 mg $PdCl_2$ katalizör, 8 saat reaksiyon süresi için oluşan a,b) hidroksitli ara ürün ve c,d) Cr_2O_3’e ait 10kx ve 50 kx büyütmedeki FESEM görüntüleri

Şekil 12’ de 40 bar H_2 kısmi basıncı, pH 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 10 mg $PdCl_2$ katalizör, 8 saat reaksiyon süresi için oluşan hidroksitli ara ürün ve 900 °C’de 2 saat ısıtma ile sentezlenmiş Cr2O3’e ait XRD toz desenleri verilmiştir. XRD toz desenlerinden hidroksitli ara ürünün yarı amorf nano yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Cr2O3’e ait XRD toz deseninde ise bütün piklerin rombohedral fazda indislendiği bileşiğin safsızlık piki içermediği bulunmuştur. HighScore Plus programı ile yapılan XRD yapı analizi sonucunda sentezlenen bütün Cr_2O_3 bileşiklerinin safsızlık içermedikleri, 01-082-1484 PDF nolu faz ile uyum içinde olduğu, Rombohedral yapıda R-3C uzay grubuna sahip ve a= 4.9570 Å, c= 13.5923 Å birim hücre boyutlarına sahip oldukları bulunmuştur. XRD ölçümlerine göre sentez pH’ının sentezlenen bileşiklerin saflığına etki etmediği bulunmuştur. Teorik XRD pikleri ile deneysel XRD piklerinin tam örtüştüğü şekil 13’de görülmektedir.



Şekil 12. 40 bar H_2 kısmi basıncı, pH 6 olarak, 800 rpm reaktör karıştırma hızı, 10 mg $PdCl_2$ katalizör, 8 saat reaksiyon süresi için oluşan a) hidroksitli ara ürün ve b) 900°C'de 2 saat ısıtma ile sentezlenmiş Cr_2O_3'e ait XRD toz desenleri



Şekil 13. Optimum şartlarda 900 C'de 2 saat ısıtılarak sentezlenen Cr_2O_3'e ait deneysel ve teorik XRD piklerinin karşılaştırılması

3.3 Alüminotermik İndirgeme Yöntemiyle Düşük Karbonlu Krom Üretimi Optimizasyon Çalışmaları

Bu çalışmada, %99 saflıkta sentezlenen yeşil Cr_2O_3 (krom (III) oksit) kullanılarak, alüminotermik indirgeme yöntemi ile düşük karbonlu saf krom metali üretimi gerçekleştirilmiştir. İndirgeme süreci, kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi (SHS) ilkelerine dayanmaktadır. Bu amaçla, indirgenme tepkimesini başlatmak ve reaksiyon sıcaklığını artırmak için (Yükseltgeyici-1 ve Yükseltgeyici-2) enerji verici olarak kullanılmış, metalik alüminyum (Al) ise indirgen madde olarak kullanılmıştır.

Deneyler laboratuvar ölçekli gerçekleştirilmiş ve elde edilen ürünler değerlendirilmiştir. Laboratuvar ölçeğinde yaklaşık 800 gramlık karışımlar hazırlanmış; optimum karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla çeşitli ağırlıkça farklı Al/Yükseltgeyici-1/Yükseltgeyici-2/Cr_2O_3 oranlarında deneyler yapılmıştır. Reaksiyonlar açık atmosferde, magnezyum şeridi ile başlatılmış; reaksiyon sonrası soğuyan ürün potadan çıkarılarak cüruf ve metal fazları fiziksel olarak ayrılmıştır. Şekil 14' de deney aşaması ve üretilen düşük karbonlu krom metalinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 14. Alüminotermik indirgeme işlemi sırasında reaksiyonun pota içerisindeki ilerleyişi (solda) ve deney sonucunda elde edilen düşük karbonlu krom metalinin nihai görünümü (sağda).

3.3.1. Reaksiyon Karışımındaki Enerji Verici ve İndirgen Madde Miktarlarının Krom Verimi Üzerindeki Etkisi

Karışımda kullanılan temel bileşenlerin miktarları ile düşük karbonlu krom metali sentez verimi ve krom geri kazanımı Tablo 7'de verilmiştir. Deneylerde stokiyometrik Al, Yükseltgeyici-1 ve Yükseltgeyici-2 miktarlarının krom verimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tablo 11'de görülebileceği üzere, metal verimi ve krom geri kazanım oranları hesaplanmıştır.

Tablo 7. Karışımlardaki ana bileşenlerin miktarları

Deney No	Cr_2O_3 (g)	Al tozu (g)	Yükseltgeyici-2 (g)	Stokiyometrik Al miktarı (%w/w)	Ergimeyi Kolaylaştırıcı (g)	Yükseltgeyici-1 (g)	Cr Metal Verimi (%)
Deney 1	100	50.00	0	140	4	22.50	69.22
Deney 2	80	47.51	20	120	4	2.5	67.22
Deney 3	200	118.76	50	120	10	6.25	92.37
Deney 4	200	99.12	50	100	10	6.25	67.90
Deney 5	80	47.51	20	120	4	4	51.08

Deneysel parametrelerin sistematik biçimde değiştirilmesiyle, özellikle indirgeme ajanı (Al) ve oksitleyici bileşenler (Yükseltgeyici-1, Yükseltgeyici-2) arasındaki dengenin krom metal verimi üzerinde belirleyici olduğu gözlemlenmiştir.

Reaksiyon sistemlerinde Yükseltgeyici-1 miktarı düşürüldüğünde, genellikle Yükseltgeyici-2 ilavesi ile sistemdeki toplam oksijen dengesi yeniden sağlanmaya çalışılmıştır. Deney 2 ve Deney 5'te aynı miktarda Yükseltgeyici-1 kullanılmasına karşın aynı amaçla Yükseltgeyici-2 ilavesiyle reaksiyonun ilerlemesi araştırılmıştır. Ancak elde edilen metal verimlerinin sırasıyla %67.22 ve %51.08 düzeyinde kalması, bu yaklaşımın tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu durum, Yükseltgeyici-2'ün yüksek oksidasyon basamağındaki krom türü olarak indirgenebilirliğine karşın, reaksiyon başlatma sıcaklığına ulaşmada Yükseltgeyici-1'ün rolünün daha kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük Yükseltgeyici-1 miktarlarının reaksiyonun başlaması ve ısıl sürekliliğinin sağlanmasında yetersiz kaldığı; bu bağlamda reaksiyonun tam ilerlemeden sona erdiği düşünülmektedir.

Deneyler arasında en yüksek krom metal verimi %92.37 ile Deney 3'te elde edilmiştir. Bu deneyde, indirgeme ajanı olarak kullanılan alüminyum tozu miktarı teorik stokiyometriye göre %120 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda sistemde yeterli düzeyde oksitleyici olan Yükseltgeyici-1 (6.25 g) ile reaksiyon koşullarının optimum seviyeye getirildiği anlaşılmaktadır. Reaksiyonun bu bileşimde daha kararlı ilerlemesinde, sistemin ekzotermik ısı üretimini sürdürebilecek yeterli miktarda Al' un bulunması ve Yükseltgeyici-2'ün katkısıyla sistemin oksijen dengesi sağlanmış olması etkili olmuştur.

Deney 4'te, toplam Cr_2O_3 ve Yükseltgeyici-2 miktarı sabit tutulmasına rağmen indirgen madde oranı %100 seviyesine düşürülmüş ve buna bağlı olarak metal verimi %67.90 olarak gerçekleşmiştir. Bu bulgu, indirgen madde olarak kullanılan Al miktarının yalnızca indirgeme ajanı değil, aynı zamanda reaksiyonun ekzotermik karakterini sürdürebilecek temel enerji kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır.

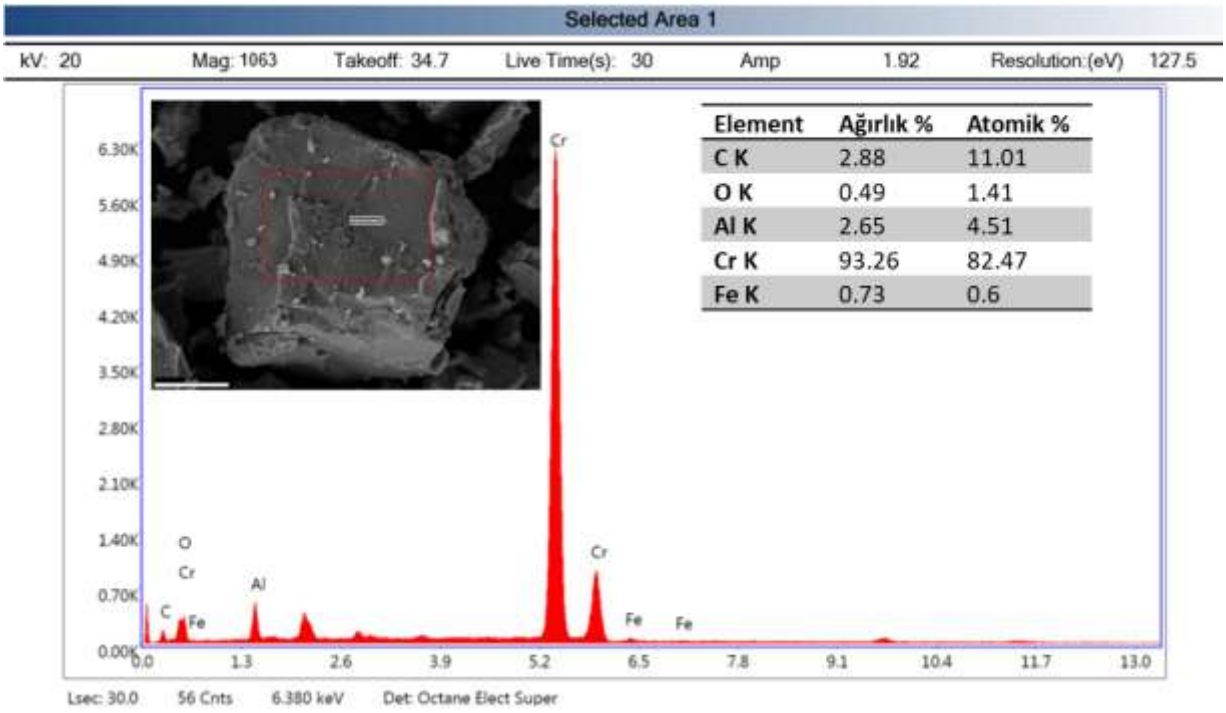
Deney 1, Yükseltgeyici-1 miktarının en yüksek olduğu (22.5 g) deneydir. Ancak sistemde Yükseltgeyici-2 katkısı bulunmamakta ve Cr_2O_3 tek başına oksit kaynaklı olarak yer almaktadır. Al miktarı teorik oranın %140'ı seviyesinde tutulmuş olmasına rağmen, elde edilen krom verimi %69.22'de kalmıştır. Bu durum, aşırı Yükseltgeyici-1 varlığının reaksiyon sırasında lokal ısı dengesizliği ve bileşenlerin ayrışması gibi olumsuz etkilere neden olduğunu düşündürmektedir.

Sonuç olarak, alüminotermik indirgeme reaksiyonlarının başarıyla sürdürülebilmesi ve yüksek verimli düşük karbonlu krom metali üretimi açısından, reaktif bileşenlerin (Cr_2O_3, Yükseltgeyici-2, Al, Yükseltgeyici-1) miktarlarının dengeli bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Özellikle indirgen Al miktarının teorik stokiyometrik miktarın üzerine çıkarılması, sistemin ekzotermik karakterini destekleyerek ürün verimini artırmaktadır. Oksitleyici bileşen olarak Yükseltgeyici-1'ün belirli bir sınırın üzerinde kullanımı ise reaksiyon verimini olumsuz etkileyebilmekte, bu nedenle dikkatli dozajlama gerektirmektedir.

3 numaralı deneye ait krom metalinin kimyasal bileşimi Tablo 8' de verilmiştir. Tablo 12' de görüldüğü üzere, Cr %89.16 olarak bulunmuştur. Metalde ki Al, reaksiyon karışımında kullanılan Al tozundan kaynaklanmaktadır. Al miktarı stokiyometrik oranın üzerinde olduğu için, reaksiyon sırasında fazla miktarda Al alaşımın içine safsılık olarak katılabilmektedir.

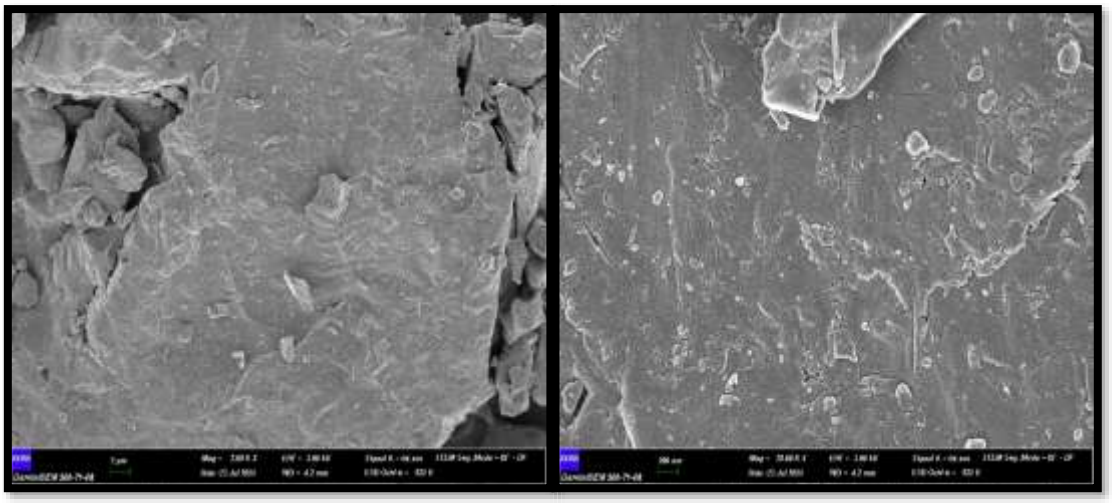
Tablo 8. Deney 3' ait XRF Analiz sonucu

Element	Ağırlık %
Cr	89.16
Al	9.03
Fe	1.58
Si	0.23



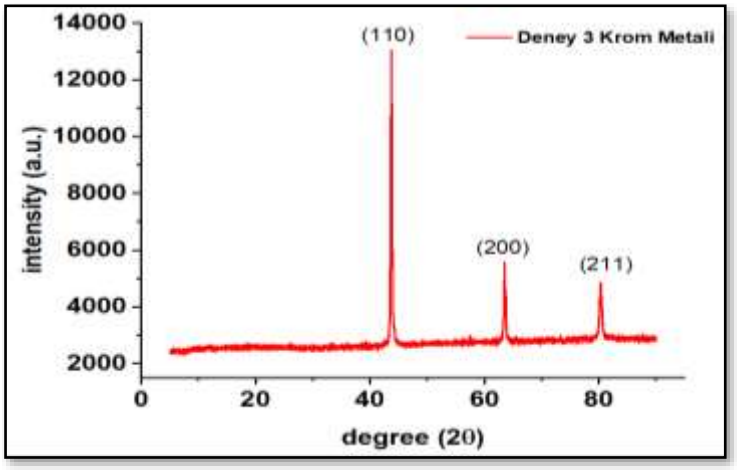
Şekil 15. Deney 3' e ait krom metalinin FESEM-EDX analizi sonucu

Şekil 15' da sunulan 3 numaralı deneye ait krom metalinin FESEM-EDX analizi sonucuna göre, numunenin yüzey bileşimi belirlenmiştir. EDX verileri ile XRF analiz sonuçlarının genel olarak birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 16. 3 numaralı deneye ait düşük karbonlu krom metalinin yüzey morfolojisine ilişkin FESEM görüntüleri.

Şekil 16' de görülen FESEM görüntüleri, 3 numaralı deneyde elde edilen düşük karbonlu krom metalinin yüzey morfolojisini göstermektedir. Sol taraftaki görüntü 2 µm ölçekli ve 2.00KX büyütmede, sağ taraftaki görüntü ise 200 nm ölçekli ve 20.00KX büyütmede kaydedilmiştir. Görsellerde, mikrokristalin yapılar ile birlikte gözenekli bir yapı dikkat çekmektedir. Bu gözeneklilik, SHS (Kendiliğinden İlerleyen Yüksek Sıcaklık Sentezi) yöntemi sırasında açığa çıkan gazların numune içerisinden uzaklaşmasıyla oluşmuş olabilir. Ayrıca, yüzeydeki ince partiküller ve homojen dağılım, indirgeme reaksiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ve metal matrisinde Cr fazının baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 17. 3 numaralı deneye ait düşük karbonlu krom metalinin XRD deseni. (Türkçe)

Şekil 17'de görülen X-ışını kırınım (XRD) deseni, SHS yöntemiyle elde edilen düşük karbonlu krom metaline aittir. Desende belirgin olarak görülen 2θ açılarındaki 44.4°, 64.6° ve 81.7° pikleri sırasıyla (110), (200) ve (211) düzlemlerine karşılık gelmekte olup, bu değerler referans kodu 00-001-1250 olan saf kubik yapıdaki krom metaline aittir. Kristal yapı, Im3m uzay grubuna ait olup, kafes parametresi a=2.8950 Å olarak belirlenmiştir.

Desende herhangi bir ikincil faza ait piklerin gözlemlenmemesi, üretilen krom metalinin yüksek saflıkta olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, FESEM-EDX ve XRF analizlerinden elde edilen verilerle de uyumludur. Piklerin dar ve simetrik olması, ürünün kristalin yapısının iyi oluştuğunu ve SHS yöntemiyle gerçekleştirilen indirgeme sürecinin başarılı olduğunu göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Elmacı Madencilik A.Ş' ye ait yerli kaynaklardan elde edilen yeşil krom oksit (Cr_2O_3) ara ürünü, alüminotermik yöntemle indirgenerek düşük karbonlu krom metali üretimi gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon karışımında kullanılan alüminyum (Al), Yükseltgeyici-2 ve enerji sağlayıcı Yükseltgeyici-1 miktarlarının krom verimi üzerindeki etkileri araştırılmış ve optimum reaktif oranları belirlenmiştir. Kimyasal analizler, reaksiyon ürünlerinde Cr metal içeriği ve geri kazanım verimlerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

En yüksek krom metal verimi %92,37 olarak bulunmuş, bu verim 120 % stokiyometrik Al içeren karışımda elde edilmiştir. Üretilen alaşımlarda C ve S miktarlarının düşük seviyelerde olması, ürünün düşük karbonlu krom metali olarak sınıflandırılmasını mümkün kılmıştır. FESEM ve XRD analizleri, indirgenen metal fazının yüksek saflıkta ve tanımlı kristal yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Elde edilen bulgular, optimize edilen alüminotermik indirgeme yöntemiyle düşük karbon içeriğine sahip yüksek saflıkta krom metalinin, endüstriyel ölçekte üretilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yöntem, mevcut yüksek enerji tüketimli geleneksel proseslere alternatif çevreci ve ekonomik bir çözüm olarak değerlendirilebilir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Elmacı Madencilik A.Ş. bünyesinde yürütülen Ar-Ge faaliyetleri kapsamında gerçekleştirilmiş olup, proje sürecinde TÜBİTAK 1507 - KOBİ Ar-Ge Başlangıç Destek Programı ve KOSGEB Ar-Ge ve İnovasyon Programı tarafından sağlanan mali destekler, teknik ilerlemeye önemli katkı sağlamıştır. Sağladıkları desteklerden dolayı ilgili kurumlara teşekkür ederiz.

6. Kaynakça

[1] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA). (2022). *Krom*. Erişim adresi: https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/krom (Erişim tarihi: Kasım-Aralık 2022).

[2] Fırat Kalkınma Ajansı. (2020). *Elâzığ İli Yüksek Karbonlu Ferrokrom Üretim Tesisi Ön Fizibilite Raporu*. Malatya, s. 48.

[3] Betteridge, W. (1974). *Superalloys*. London: Edward Arnold.

[4] Akyüz, S., & Usta, M. (2022). Savunma sanayisinde kullanılan HS 188 süperalaşımının oksidasyonu üzerine nitrasyon etkisinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(1), 151–163. https://doi.org/10.37206/dergi.1041649

[5] Ekinci, D. (1997). *II. Dünya Savaşı Yıllarında Türkiye'nin Ekonomik ve Siyasi Politikaları*. s. 202.

[6] Tuna, İ. K. (2011). *Stratejik ve Kritik Madenlere İlişkin Küresel Politikalar Çerçevesinde Türkiye'deki Stratejik ve Kritik Madenlerin Ulusal Güvenliğe Etkileri* (Yüksek lisans tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü).

[7] Gasik, M. I. (2013). Technology of Chromium and Its Ferroalloys. In *Handbook of Ferroalloys* (pp. 267–316). Elsevier.

[8] Güngör, M. (2015). *Eti Krom konsantreleri kullanılarak kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile düşük karbonlu ferrokrom alaşımlarının üretilmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[9] Xu, H. B., Shi, Y. L., Zhang, Y., Cai, Z. H., Li, Z. H., Cheng, X. C., Zhang, X. F., Chen, X. H., Zhang, Y., & Liu, J. W. (2010). A clean production method of sodium chromate by pressure oxidative leaching of chromite ore (Patent No. CN201010146648.1). China.

[10] Zhang, H., Xu, H. B., Zhang, X., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2014). Pressure oxidative leaching of Indian chromite ore in concentrated NaOH solution. *Hydrometallurgy*, 142, 47–55. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.003

[11] Zhang, Y., Zheng, S. L., Xu, H. B., Du, H., & Zhang, Y. (2010). Decomposition of chromite ore by oxygen in molten NaOH–Yükseltgeyici-1. *International Journal of Mineral Processing*, 95(1–4), 10–17.

[12] Zhang, Y., Li, Z. H., Qi, T., Wang, Z. K., & Zheng, S. L. (1999). Green chemistry of chromate cleaner production. *Chinese Journal of Chemistry*, 17(3), 258–266.

[13] Duan, S. Z., & Qiao, Z. Y. (1990). *Molten Salt Chemistry*. Beijing: Metallurgical Engineering Press. China

[14] Sun, Z., Zhang, Y., & Zheng, S. L. (2009). A new method of potassium chromate production from chromite and KOH–KNO_3–H_2O binary submolten salt system. *AIChE Journal*, 55(10), 2646–2656.

LİTYUM İYON PİLLERDE ANOT AKTİF MADDE OLARAK KULLANILABİLME POTANSİYELİNE SAHİP $MnCr_2O_4$ ÜN SENTEZİ VE ELEKTROKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zeynep DURMUŞ

Öğrenci, Kayseri Üniversitesi, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu, Laboratuvar Teknolojisi, Kayseri-Türkiye

Kübra TEKEL

Öğrenci, Kayseri Üniversitesi, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu, Laboratuvar Teknolojisi, Kayseri - Türkiye

Ali Rıza TÜRKMEN

Doktora Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye

Kültiğin Çağrı BARBAS

Yüksek Lisans Öğrencisi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri-Türkiye
ASPİLSAN Enerji A.Ş. Kayseri-Türkiye

Halil ŞAHAN

Doç.Dr., Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Kayseri-Türkiye
Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERNAM), Kayseri-Türkiye,

Özet

Spinel yapıdaki $MnCr_2O_4$ (M) anot aktif maddesi yüksek deşarj kapasitesi ve kararlı döngü performansı ile araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu çalışmada M bileşiği çözelti yakma yöntemi ile sentezlenmiştir. Anot aktif maddenin elektrokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi için M anot aktif maddesi ağrlıkça belirli oranlarda karbon veya karbon nano tüp gibi iletken maddeler kullanılarak kompozit anot aktif madddeleri sentezlenmiştir. Anot aktif maddenin sentez ve elektrokimyasal özelliklerinin optimize edilmesi projenin başarılı olması için en önemli kriterdir. Bunun için anot aktif madde karakterizasyonu değişik analiz yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Erciyes üniversitesi Teknoloji ve Araştırma Merkezinde (TAUM) bulunan Panalitical marka Emperian model X-ışınları toz difraktometresi kullanılarak bileşiğin saflığı, kristal yapısı ve birim hücre parametereleri bulunmuştur. Aynı merkezde bulunan Zeiss marka alan taramalı taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak bileşiğin tane yüzey özellikleri, tane boyutu ve dağılımı analiz edilmiştir.

Elektrokimyasal çalışmaların tamamı Erciyes Üniversitesi, Nanoteknoloji Araştırma merkezinde bulunan Lityum batarya araştırma laboratuarında bulunan sızdırmaz deney kabini (Glove Box) içinde hazırlanan Swagelok tip piller kullanılarak yapılmıştır. Şarj-deşarj ölçümleri MTI marka çok kanallı potansiyostat/galvanostat kulllanlılarak yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler ile hazırlanan yarı hücrelerin elektrokimyasal performans özellikleri incelenmiştir. Ticari anot aktif maddelerin pil kapasitelerine eşdeğer veya onlardan daha yüksek düzeyde pil performansı elde etmek aktif maddenin ticarileşmesi için önemli bir parametredir.

Anahtar Kelimeler: $MnCr_2O_4$, Anot aktif madde, Lityum iyon piller, Deşarj kapasitesi

Abstract

Spinel structured $MnCr_2O_4$ (M) anode active material attracts the attention of researchers with its high discharge capacity and stable cycling performance. In this study, M compound was synthesized by solution combustion method. In order to improve the electrochemical properties of the anode active material, composite anode active materials were synthesized by using conductive materials such as carbon or carbon nanotubes in certain proportions of M anode active material. Optimizing the synthesis and electrochemical properties of the anode active material is the most important criterion for the success of the research. For this purpose, the characterization of the anode active material was carried out using different analysis methods. The purity, crystal structure and unit cell parameters of the compound were determined using Panalitical brand Emperian model X-ray powder diffractometer at Erciyes University Technology and Research Center (TAUM). The grain surface properties, grain size and distribution of the compound were analyzed using a Zeiss field scanning scanning electron microscope (FESEM) at the same center. All of the electrochemical studies were carried out using Swagelok type batteries prepared in a sealed test cabinet (Glove Box) in the Lithium battery research laboratory located in Erciyes University, Nanotechnology Research Center. Charge-discharge measurements were performed using MTI brand multichannel potentiostat/galvanostat. Electrochemical measurements were carried out to investigate the electrochemical performance characteristics of the prepared semi cells. Achieving battery performance equivalent to or higher than the battery capacities of commercial anode active materials is an important parameter for the commercialization of the active material.

Keywords: $MnCr_2O_4$, Anode active material, Lithium ion batteries, Discharge capacity

1.Giriş

Yüksek lityum depolama kapasitesine, yüksek lityum difüzyon hızına ve uzun çevrim ömrüne sahip elektrot malzemelerinin tasarlanması, yüksek performanslı lityum-iyon pillerin (LIB'ler) geliştirilmesi için önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Grafit, ticari LIB'ler için mevcut anot malzemesidir, ancak sınırlı kapasitesi (372 mAh g^{-1}) ve düşük potansiyeli (Li/Li^+'ye karşı 0,1 V), hızlı şarjlar sırasında lityum kaplama riskini azaltmak için daha yüksek kapasitelere ve daha pozitif voltajlarına sahip alternatifler gerektirmektedir [1]. Geçiş metal oksitleri (MO'lar), grafitten 2-3 kat daha yüksek teorik kapasiteler ve daha güvenli lityum katkılanma potansiyelleri sunan en umut verici anot malzemeleri arasındadır [2]. Bununla birlikte, MO'lar zayıf elektronik iletkenlikten ve döngü sırasında hacim değişiklikleri nedeniyle yapısal bozulmalara uğramaktadırlar, bu durum da anot aktif maddelerin elektrokimyasal performanslarını sınırlar [3]. Bu problemlere rağmen, CoO/Co_3O_4, MoO_3, SnO_2, NiO, ZnO ve $NiFe_2O_4$ gibi MO'lar yüksek teorik kapasiteleri ve doğal bollukları nedeniyle alternatif anot aktif madde olarak kullanılabilme potansiyeli göstermiştir [4].

Kobalt oksit (CoO) anot aktif maddesi özellikle caziptir ve 715 mAh g^{-1} gibi yüksek bir teorik kapasite sunmaktadır [5]. Bununla birlikte, pratik kullanımı, lityum şarj-deşarjı sırasında hacim değişiklikleri nedeniyle zayıf iletkenlik ve döngü kararlılığı nedeniyle engellenmektedir [6].

Bu sorunları gidermek için, grafen veya karbon nanotüplerle birleştirilmiş CoO gibi karbon bazlı kompozitler, Li-iyon depolama kapasitesini artırmak ve döngü performansını iyileştirmek için geliştirilmiştir[7]. Farklı MO'lar arasında, Mn bazlı oksitler bolluğu, düşük maliyeti, güvenliği, yaygın kullanılabilirliği ve çevre dostu olması nedeniyle yaygın olarak çalışılmıştır [8] . Ayrıca, krom (III) oksit (Cr_2O_3) de yüksek teorik kapasitesi (1058 mAh g -1), düşük elektro itici kuvvet (EMF) değeri (1,085 V) ve düşük maliyeti nedeniyle son günlerde yeni bir anot malzemesi olarak büyük ilgi görmektedir [9-11]. İlginç bir şekilde, Cr_2O_3 kristal sistemine Mn eklenmesi spinel $MnCr_2O_4$ (M) oluşturur ki bu da doğal avantajları olan mükemmel manyetik ve elektriksel özellikleri nedeniyle yeni ve potansiyel bir elektroaktif malzeme olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, M bileşiği lityum katkılma esnasında mekanik bozulma ve kararsız katı elektrolit ara faz (SEI) oluşumu nedeniyle 50 döngüye kadar ciddi kapasite kaybına uğramaktadır ve bu da bu tür malzemenin LIB'lerde geliştirilmesini ve pratik uygulamasını büyük ölçüde kısıtlamaktadır. Bu amaçla bu çalışmada ilk defa M bileşiği iyonik ve elektronik iletkenliğini artırmak için karbon veya iletken kaplama ve nano boyutta tanecik sentez yöntemleri kullanarak sentezlenmiştir. Karbon miktarı, cinsi ve yapısı, aktif maddenin saflığı, tane boyutu, tane boyutu dağılımı ve iletkenlik sağlayıcı karbon miktarı ve dağılımı gibi faktörler M anot aktif maddesinin elektrokimyasal performansına etkisi incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. $MnCr_2O_4$ (M) bileşiğinin Sentezi

Glisin-nitrat yakma yönteminin; ısıl işlem sıcaklığının düşük, sentez süresinin kısa, tanecik boyutunun küçük ve tanecik boyutu dağılımının homojen olması nedeniyle daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Bu yüzden bu çalışmada M bileşiğinin sentezinde glisin nitrat metodu (GNP) kullanılmıştır. [12] Stokiyometrik oranda $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ (Merck), $Mn(CH_3COO)_2.4H_2O$ (Sigma) tuzlarının saf suda doygun çözeltisi hazırlandı. Oluşan çözeltiye mol sayıları asetat anyonları ile aynı olacak şekilde derişik nitrik asit ve asetat anyonlarının ¼ kadar olan glisin eklendi. Burada glisin hem yakıt olarak görev yapmakta hem de metal katyonlarını kompleks şeklinde bağlayarak çökmelerine engel olmaktadır. Nitrat ve asetat iyonları ise, glisinin yanması sırasında oksijen sağlamaktadır. Elde edilen çözelti, çözücünün fazlası uzaklaşana kadar manyetik karıştırıcılı ısıtıcı ile karıştırarak kontrollü bir şekilde ısıtıldı. Çözücünün fazlası uzaklaştığında oluşan viskoz kahverengi görünümdeki köpük, ısıtmaya devam edildiğinde kendiliğinden yanarak süngerimsi kül görünümde katı maddeye dönüştü. Katı madde aralıklarla öğütülüp bir kül fırınında 1000 °C'da 24 saat süre ile ısıtıldı.

2.2. M anot aktif maddenin karbonlu kompozitlerinin sentezlenmesi (M@C) Katı numune agat havan içerisinde öğütülerek üzerine son ürün M bileşiğinin kütlesi esas alınarak kütlece sırası ile %100 sakkaroz (M-S) , %200 polietilen glikol, PEG-400 (M-P), %10 -OH grupları ile fonksiyonlaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp (M-C), %100 sakkaroz, %200 polietilen glikol karışımı (M-S-P) ve son olarak %100 sakkaroz ve %200 PEG ve %10 CNT (M-S-C) oranlarda karbon kaynağı ilave edilip karıştırıldı. Öğütülmüş karışımlar, kayık şeklindeki alümina kroze içinde tüp fırına yerleştirildi. Yatay fırın içerisinden 30 dakika argon gazı geçirildikten sonra bileşikler 600º'C de 5 saat argon atmosferinde 5 °C/dak ısıtma hızında ısıtıldı ve soğuyana kadar argon atmosferinde bekletildi. Tüp fırından çıkartılan maddelerin karbon oranını bulmak amacı ile kül fırında açık havada 800º'C de 1 saat yakma işlemi gerçekleştirildi.

2.2. Sentezlenen Bileşiklerin Karakterizasyonu

2.2.1. X-ışınları kırınım ölçümleri: Sentezlenen maddelerin kristal fazlarını belirlemek ve yapısal saflığını kontrol etmek amacıyla X-ışını toz kırınım deseni (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kristalin yapısal özelliklerini ortaya koyarak maddelerin

sentez sürecinde oluşan olası kristal fazlarını, faz saflığını ve herhangi bir faz karışımı olup olmadığını belirlemede önemli bir rol oynar. Bu bağlamda, PANalytical marka EMPYREAN model cihazı kullanılarak XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Toz XRD ölçümleri, 5° ile 90° arasında 2θ açısı aralığında gerçekleştirilmiş ve adım açısı 0.02° olarak ayarlanmıştır. XRD analizi sonucunda elde edilen kırınım desenleri, kristal yapıların tanımlanması için karşılaştırmalı veri tabanları ile analiz edilmiştir. Bu işlem, numunelerin kristal yapılarının uluslararası standart kristal veri tabanları (örneğin, ICSD veya PDF-4) ile karşılaştırılmasını içerir. Böylece, sentezlenen materyalin beklenen kristal fazı taşıyıp taşımadığı veya herhangi bir amorf yapı veya faz karışımı içerip içermediği tespit edilmiştir.

2.2.2. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri: Maddelerin tanecik boyutu, tanecik boyutu dağılımı ve yüzey morfolojisini detaylı bir şekilde incelemek amacıyla 20 kV gerilim değerinde çalışan alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM, ZEISS, GEMINI 500) kullanılmıştır. Bu yöntem, nanometre boyutundaki yapıların yüzey özelliklerini, partikül boyutunu ve dağılımını belirlemede oldukça hassas ve güçlü bir analiz tekniğidir. FESEM, malzemenin yüzey özelliklerini yüksek çözünürlükte inceleme olanağı sağlayarak, taneciklerin yüzey pürüzlülüğünü ve morfolojik yapısını ayrıntılı bir şekilde görüntüler.

Numuneler, FESEM ölçümleri öncesinde uygun şekilde hazırlanarak karbon bant yüzeyine serilmiştir. Ölçümlerin daha hassas ve net sonuçlar vermesi için numunelerin yüzeyleri yüksek vakum altında altın-paladyum (Au-Pd) alaşımı ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi, numune yüzeyinde iletkenliği artırarak daha iyi görüntü kalitesi elde edilmesini sağlar ve aynı zamanda yüzeyin elektron ışını ile etkileşimini optimize eder.

FESEM ile elde edilen görüntüler, sentezlenen maddelerin partikül boyutlarını ve yüzey morfolojilerini doğrudan gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Tanecik boyutu dağılımı, malzemenin homojenliğini ve sentez yönteminin etkinliğini değerlendirme açısından kritik bir parametredir. Küçük boyutlu tanecikler, özellikle enerji depolama ve kataliz gibi uygulamalarda yüzey alanını artırarak malzemenin performansını önemli ölçüde etkiler.

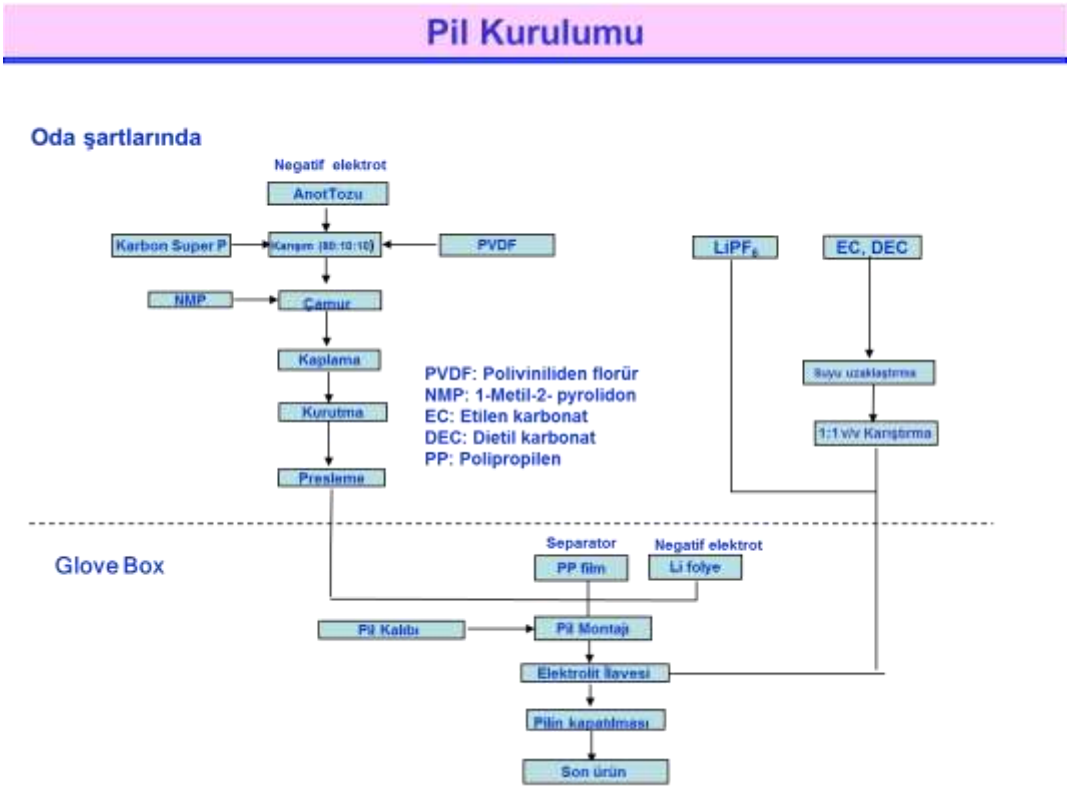
2.3. Elektrokimyasal Çalışmalar

2.3.1. Elektrolitin Hazırlanması Elektrolit çözeltisi olarak $LiClO_4$ veya $LiPF_6$'ın etilen karbonat (EC) ve dietil karbonatın (DEC) hacimce 1:1 karışımdaki 1 M çözeltisi kullanılacaktır. Elektrolit çözeltisi hazırlarken bütün işlemler, MBraun marka Unilab model gaz (argon) kabini (glove box) içinde yapılmıştır.

2.3.2. Anot Aktif Elektrotun Hazırlanması Ağırlıkça %80 M, %10 karbon süper P ve %10 polivinildenflorür (PVDF)'den oluşan karışım agat havanda öğütülür. Burada asetilen siyahı elektrik iletkenliği sağlamakta PVDF ise bağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu karışımdan alınan 3-5 mg kadar bir örnek, N-metil-2-pirolidon (NMP) ile karıştırılıp çamur haline getirildikten sonra bakır folye üzerine doktor blade tekniği ile kaplanmıştır. NMP'nin uzaklaşması için hazırlanan elektrotlar bir gece 120 ^oC'da vakumlu etüvde bekletildikten sonra yaklaşık 2 ton/cm^2 basınç uygulayarak preslenmiştir.

Pil kurulum aşamaları ve hazırlanan iki elektrotlu swagelok yarım hücre Şekil 1'de görülmektedir.





Şekil 1. İki elektrotlu swagelok yarım hücre ve pil kurulum aşamaları

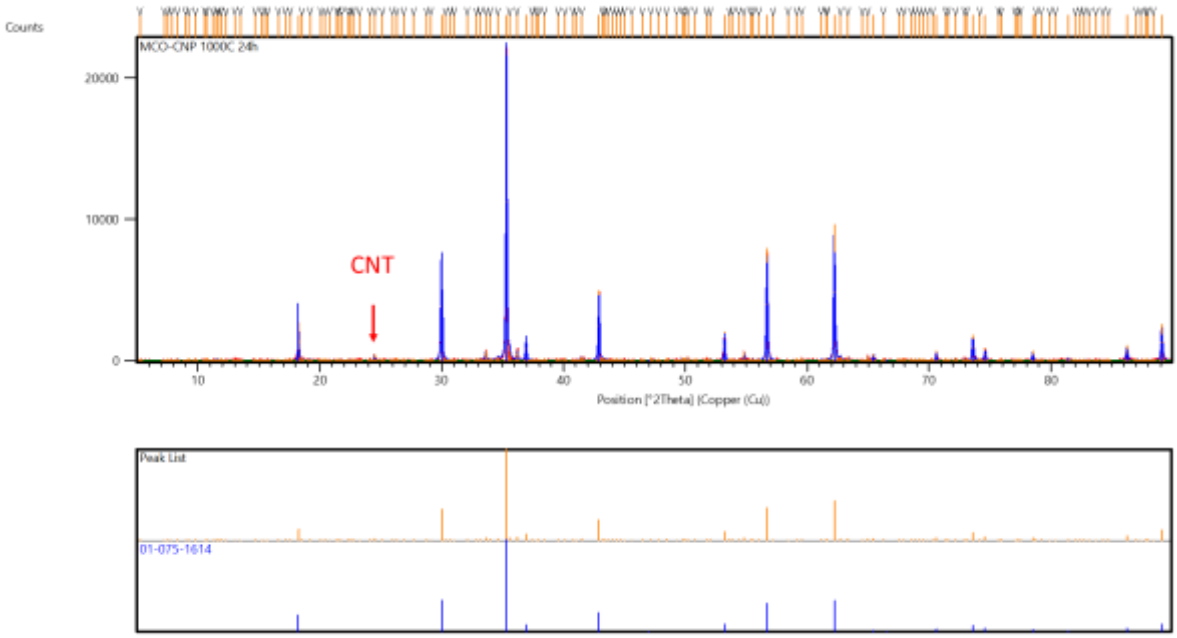
2.3.3. Referans Elektrotun Hazırlanması: Referans elektrot olarak 10 mm çapındaki lityum çubuktan (Merck) kesilerek hazırlanmış olan 12 mm çapındaki lityum disk kullanıldı. Anot hazırlama işlemi argon kabininde (glove box) yapıldı.

2.3.4. Elektrokimyasal Ölçümler: Elektrokimyasal ölçümler, PAR ve MTI marka çok kanallı galvanostat/potansiyostat/impedans analizör cihazı ile yapılmıştır. Pilin kurulumu ve ölçüm işlemleri argon kabininde gerçekleştirilecektir. Kronopotansiyometrik ölçümler için swagelok tipi pil düzeneği hazırlanıp kullanılmıştır. Anot ve katot arasına birbiriyle doğrudan teması engellemek için polipropilen separator yerleştirilmiştir. Anot, katot ve elektrolitin yerleştirilmesinden sonra pilin dengeye ulaşması için 24 saat bekletilmiştir. Dengeye gelmiş olan yarı hücre (yarım hücre pillerde karşıt ve referans elektrot olarak Li metali kullanılmıştır) ve tam hücre piller, galvanostat/potansiyostat/impedans analizör cihazı ile sırası ile 0.01- 3 V potansiyel aralığında, çeşitli akım yoğunluklarında doldurulup-boşaltılmıştır. Pilin kapasitesinin dolma-boşalma çevrim sayısı ile değişimini bulmak için bu işlem en az kez tekrarlanmıştır. Edilen verilerden kapasite/voltaj grafiği ve şarj/deşarj döngü sayısına karşı kapasite grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden yararlanarak elektrokimyasal tepkime mekanizması, faz değişimi ve kapasite kaybı ve bu kaybın türü (tersinir veya tersinmez) incelenmiştir.

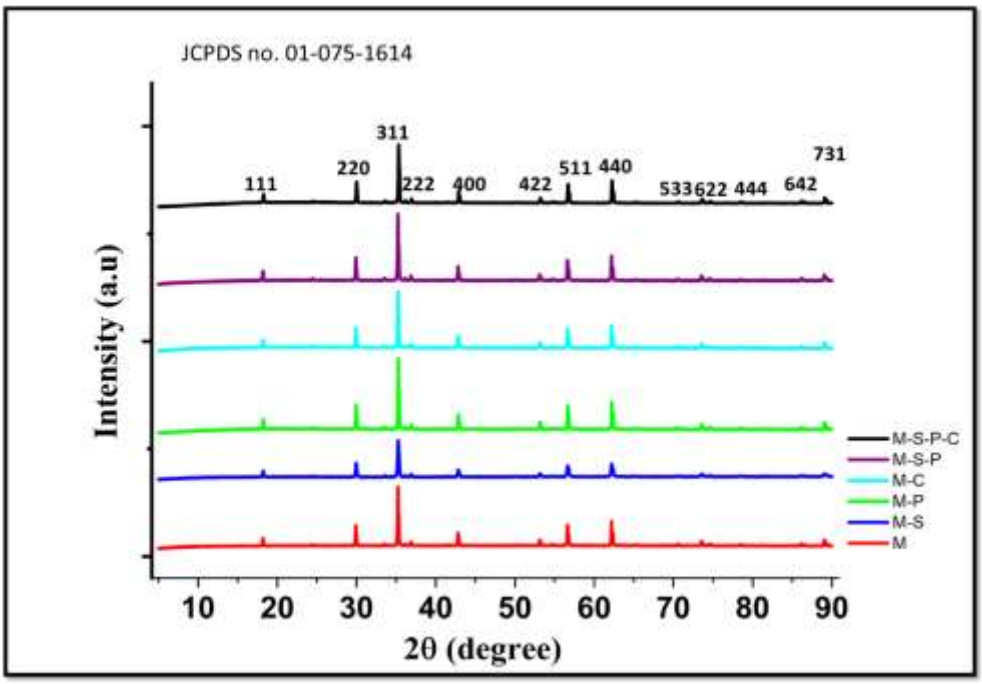
3.Sonuçlar ve Tartışma

Sentezlenen katot elektrot aktif maddelerin bazılarının XRD toz desenleri sırası ile Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Şekil 2'de saf M-S-P-C bileşiğine ait XRD toz deseni ve teorik ve deneysel piklerin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü ana difraksiyon piklerinin teorik piklerle örtüşmesi maddenin saf olduğunu kanıtlamaktadır. İndislenemeyen çok küçük şiddetteki piklerin ise reaksiyona girmeyen Cr_2O_3 piklerinin olduğu bulunmuştur. 24.3 derecedeki şiddeti küçük pikin ise CNT ait pik olduğu bulunmuştur [13]. Ayrıca XRD desenin analizinden maddenin, uzay grubu Fd3m olan kübik yapıya sahip ve birim hücre

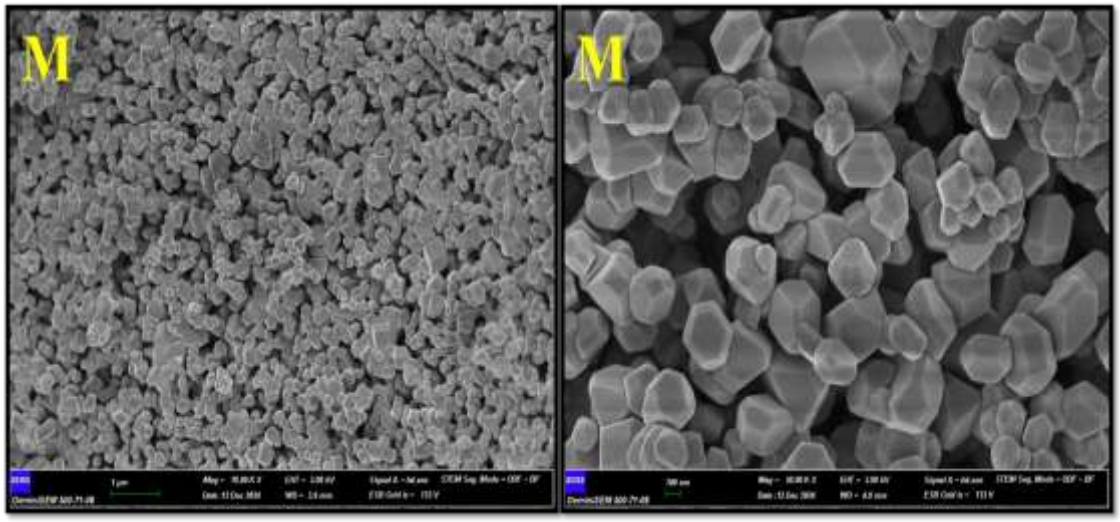
parametresinin ise 8.4370 Å olduğu bulunmuştur (JCPDS 96-433-2100) [14]. Şekil 3'de görüldüğü gibi sentezlen bütün bileşiklerin XRD toz desenlerin aynı olduğu M@karbon kompozit sentezinin bileşiğin kristal yapısında değişikliğe sebep olmadığı bulunmuştur.

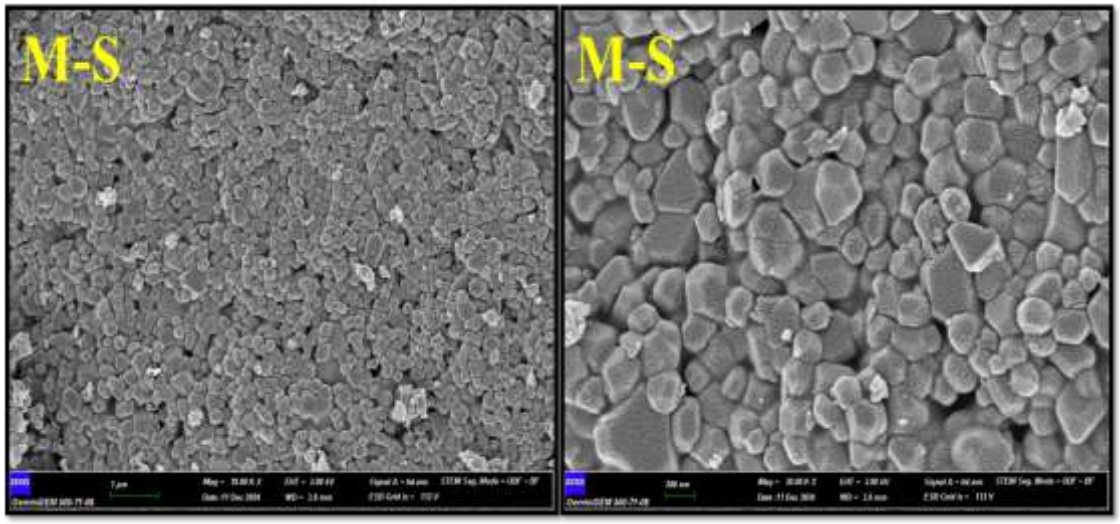


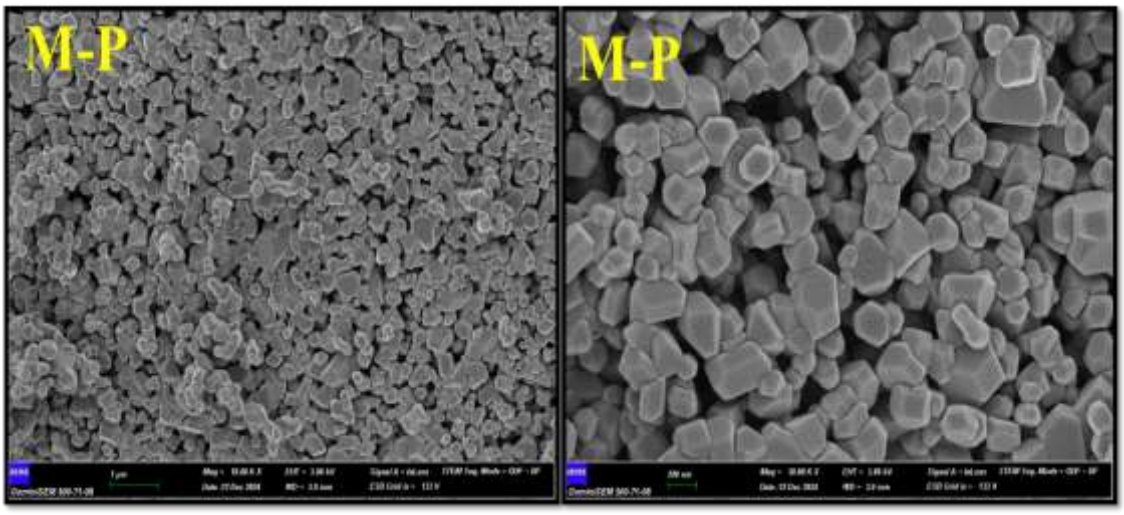
Şekil 2. M-S-P-C bileşiğinin XRD toz deseni ve teorik piklerle karşılaştırılması

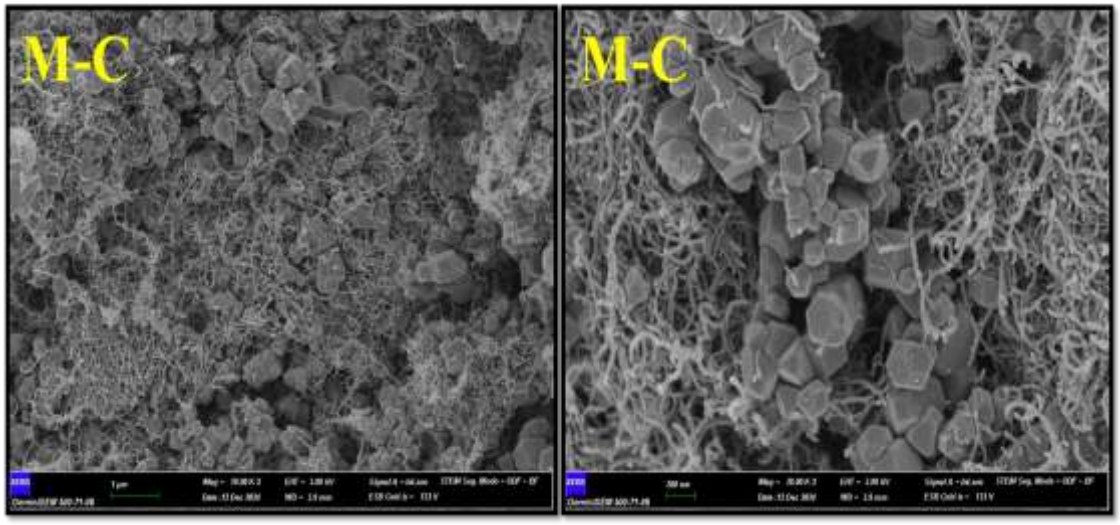


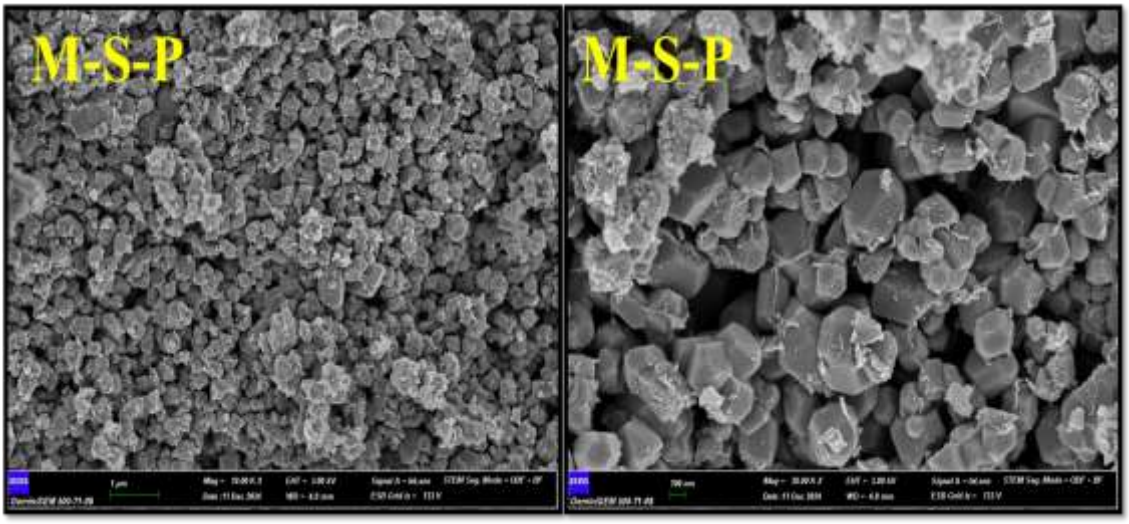
Şekil 3. Saf M ve karbon kaplanmış bileşiklere ait XRD desenleri

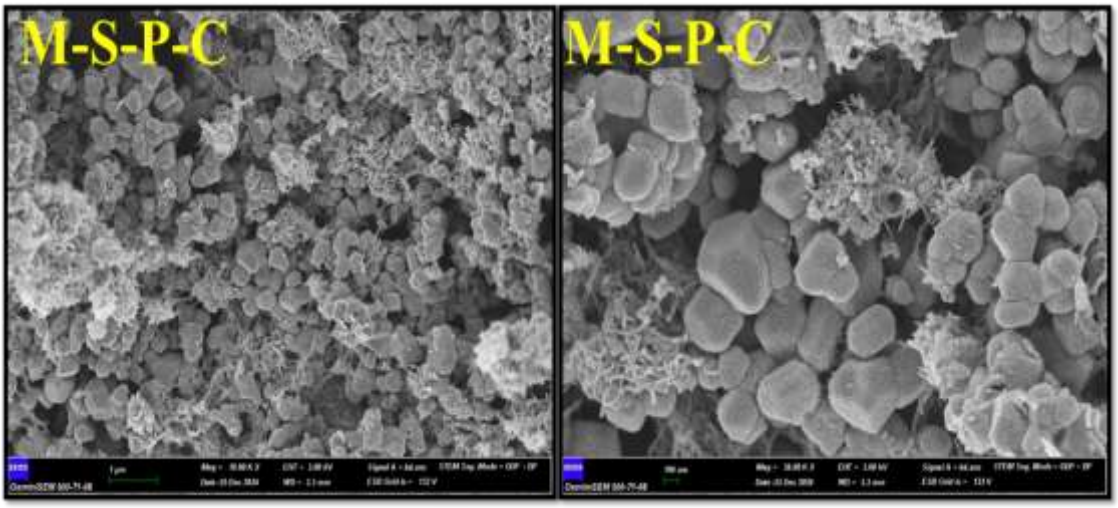

M
M


M-S
M-S


M-P
M-P

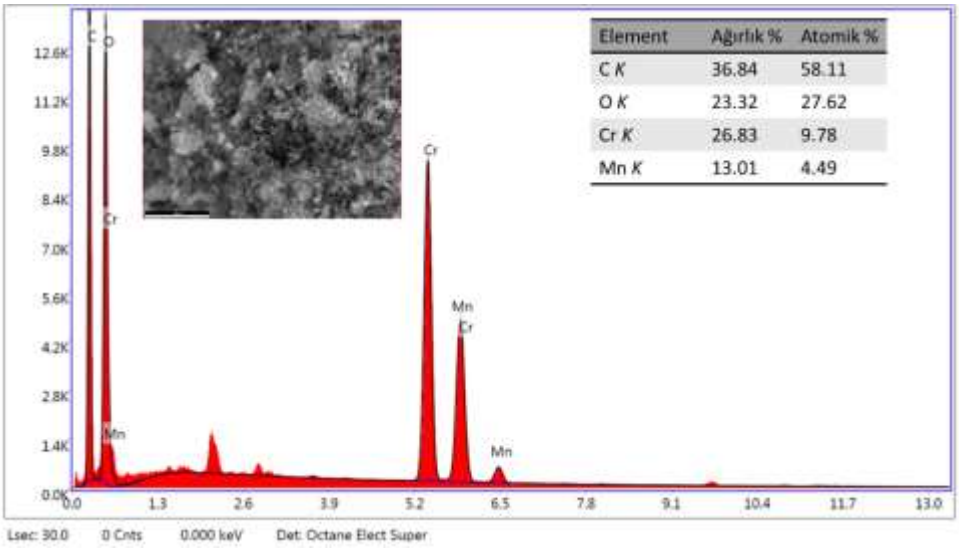

M-C
M-C


M-S-P
M-S-P

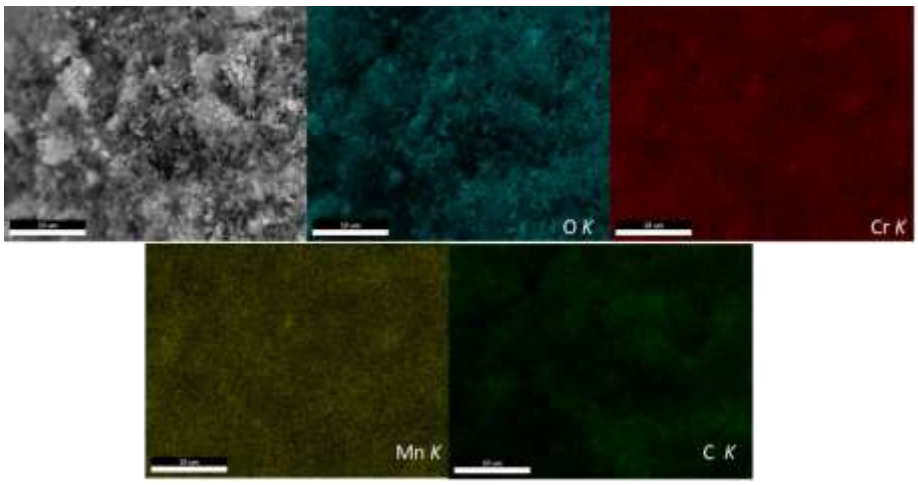


Şekil 4. Saf M ve karbon kaplanmış bileşiklerin sırası ile 10KX ve 30 KX büyütmelerde FESEM görüntüleri

Şekil 4'de görüldüğü gibi saf M bileşiğinin homojen tanecik boyutu dağılımına sahip olduğu çoğunlukla 200 nm'den daha düşük tanecik boyutuna sahip çokgen yapılardan oluştuğu görülmektedir. Ağırlıkça %100 sakkaroz eklenmiş M-S bileşiğinin tanecik boyutunun ve şeklinin değişmediği fakat sakkarozun karbona dönüşerek tanecikleri homejen kapladığı görülmektedir. Benzer şekilde ağırlıkça %100 sakkaroz ve %200 polietilen glikol eklenmiş bileşiğin de karbon ile homojen kaplandığı görülmektedir. Ağırlıkça %200 polietilen glikol (PEG) eklenmiş örnekte ise karbon miktarının düşük olmasına bağlı olarak karbon kaplamanın homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Ağrlıkça %10 karbon nanotüp (CNT) eklenmiş M-C bileşiğinde ve ağırlıkça %100 sakkaroz ve %200 polietilen glikol %10 karbon nanotüp (CNT) eklenmiş M-S-P-C bileşiğinde de CNT'lerin M taneleri arasına homojen dağıldığı görülmektedir. Karbon ve CNT tanelerinin homojen olarak M taneleri arasına ve yüzeyine dağılması elektrokimyasal performansı olumlu etkileyeceği beklemiştir.



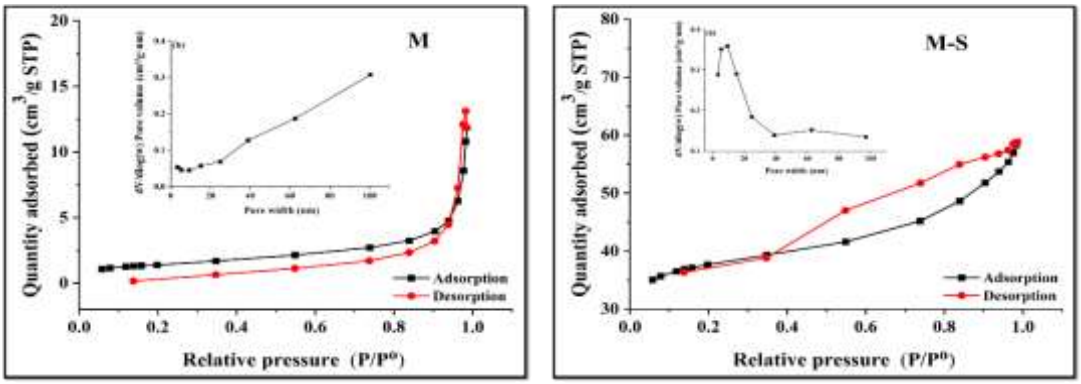
Şekil 5. M-S-P-C bileşiğinin EDX spektrumu ve element analizi

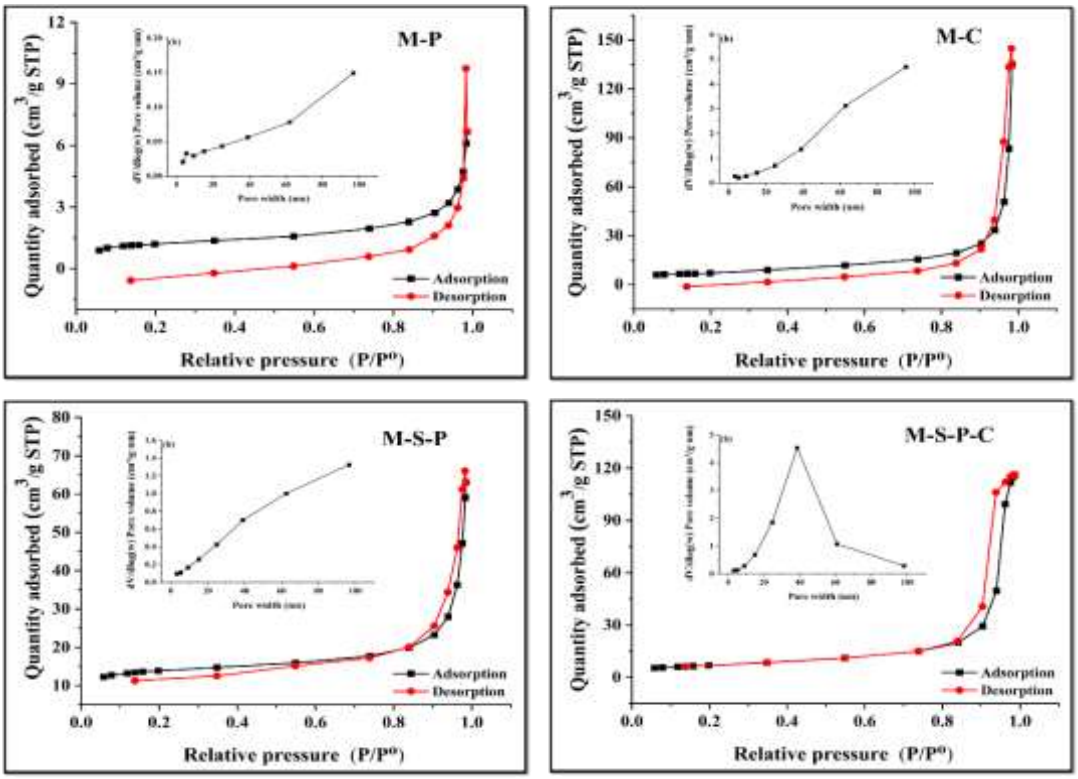


Şekil 6. M-S-P-C bileşiğinin elementel dağılım görüntüleri

Şekil 5'de M-S-P-C bileşiğinin EDX spektrumu ve element analiz sonuçları görülmektedir. Elementel analiz sonuçlarının teorik veriler ile uyumlu olduğu bulunmuştur. Şekil 6'da ise bileşikteki Mn,Cr, O ve C elementinin yüzeydeki dağılım haritaları görülmektedir. Mn,Cr, O ve C elementlerinin homojen olarak dağıldığı bulunmuştur.

Bileşiklerin karbon miktarı platin kroze kullanılarak kül fırında açık havada 800°'C de bir saat yakma işlemi ile yapılmıştır. Gravimetrik analiz sonucunda sırası ile M-S bileşiğinin ağırlıkça %19.6 amorf karbon, M-P bileşiğinin ağırlıkça % 2.6 amorf karbon, M-S-P bileşiğinin ağırlıkça 11.6 amorf karbon, M-C bileşiğinin ağırlıkça % 10.4 karbon, ve M-S-P-C bileşiğinin ise ağırlıkça %29.2 amorf karbon ve CNT içerdiği bulunmuştur.





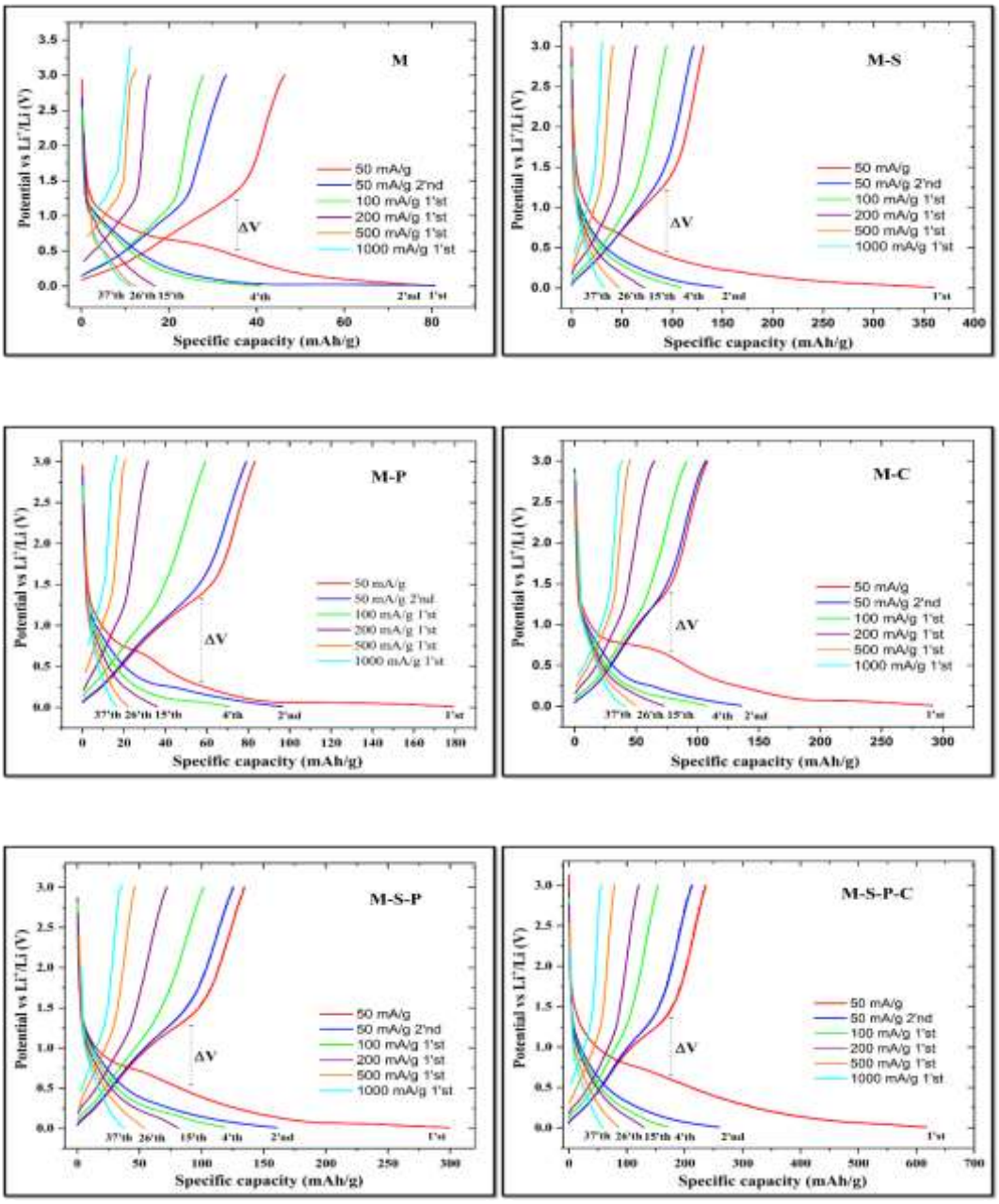
Şekil 7. Bileşiklerin N_2 adsorbsiyon-desorbsiyon izotermleri ve gözenek hacim-genişlik dağılım grafikleri

Tablo 1. Bileşiklerin bazı fizikokimyasal özellikleri

Bileşik	BET Yüzey alanı (m^2/g)	BJH Gözeneklerin yüzey alanı (m^2/g)*	BJH Gözeneklerin kümülatif hacmi (cm^3/g) *	Ortalama gözenek genişliği (4V/A-BET) (nm)
M	4.81	3.83	0.0203	21.23
M-S	106.76	45.26	0.0538	4.75
M-P	3.828	1.804	0.0151	33.6
M-C	25.51	29.19	0.223	30.6
M-S-P	40.30	20.18	0.094	18.6
M-S-P-C	24.51	34.16	0.180	21.1

Saf M ve karbon kaplı diğer bileşiklere ait yüzey alanı, Brunauer-Emmett-Teller (BET) modeli kullanılarak N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izoterminden hesaplanmıştır. (Şekil 7). Elde edilen izoterm, tip IV kategorisine girmekte ve oluşan eğrilerin döngüsü, her bileşiklerin mikro-mezo karışık gözenekli yapıya sahip olduğunu gösterir [15]. Saf M ve kompozit bileşiklere ait bazı

fizikokimyasal parametreler Tablo 1'de görülmektedir. Tbalo 1'de görüldüğü gibi M bileşiğinin karbon kaplama sonucunda yüzey alanın ve gözeneklerin kümülatif hacimlerinin büyüdüğü bulunmuştur. Bu sonuçlar, mikro-mezo gözeneklerin varlığıyla birlikte yüksek yüzey alanına sahip kompozit bileşiklerin lityum iyon pil uygulamaları için potansiyel anot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

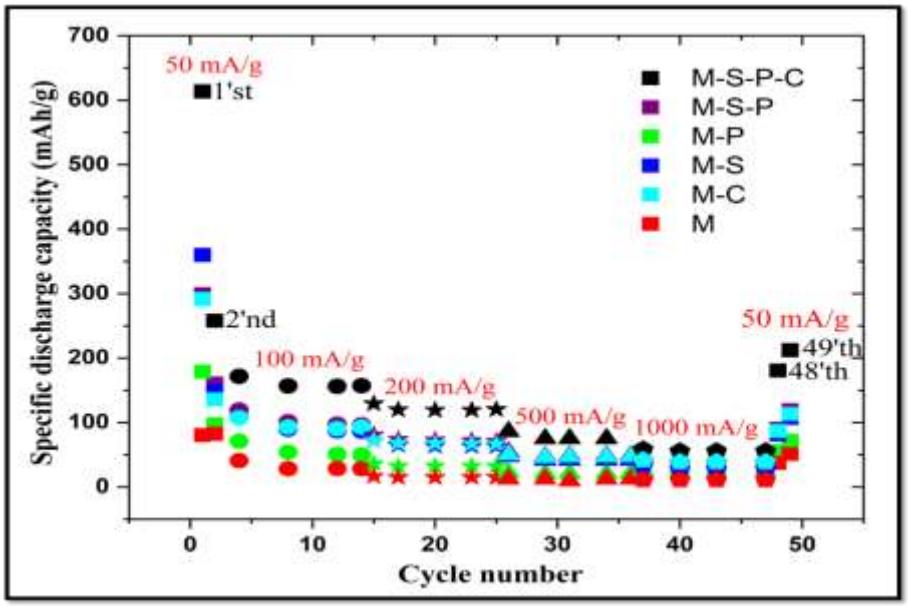


Şekil 8. M, M-S, M-P, M-C, M-S-P, M-S-P-C bileşiklerinin anot aktif madde olarak kullanıldığı yarı hücrelere ait 50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında 0.01 to 3.0 V arasındaki şarj-deşarj eğrileri

Şekil 8'de saf M ve karbonlu kompozit bileşiklerin anot aktif madde olarak kullanıldığı yarı hücrelere ait 50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında şarj-deşarj eğrileri görülmektedir.

Saf anot aktif maddenin şarj-deşarj eğrileri ile karşılaştırıldığında kompozit anot aktif maddelerin şarj-deşarj eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir. Bu durum karbon kaplama işleminin elektrokimyasal prosesin yükseltgenme indirgenme reaksiyonunda değişikliğin olmadığını göstermektedir. Şekillerde görüldüğü gibi ilk deşarj esnasında 1,1-0,9 V aralığına karşılık gelen elektrot ve elektrolit ara yüzeyinde katı elektrolit ara fazının (SEI) oluşumuna bağlı olarak ilk deşarj kapasiteleri yüksektir [16].

Şekil 9' da görüldüğü gibi, şarj ve deşarj profillerinde (ilk döngüden sonra) üç platonun varlığı gözlemlenmektedir. Şekillerden dönüşüm reaksiyon elektrokimyasal prosese dahil olduğunu anlaşılmaktadır. Yani, deşarj profilinde 1,1-0,9 V civarında gözlemlenen bir plato, elektrot ve elektrolit ayrışması nedeniyle SEI oluşumuyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, lityumlama sırasında 0,6-0,5 V'da gözlemlenen bir plato, Mn ve Cr'nin ilgili oksidasyon durumundan elementel Mn ve Cr'ye indirgenmesine karşılık gelir. Şarj döngüsünde, dönüşüm reaksiyonu yoluyla MnO ve Cr_2O_3 oluşumu nedeniyle 1,2-1,3 V bölgesinde eğimli bir plato gözlemlenir. Saf M anot aktif maddesi ile karşılaştırıldığında tüm akım yoğunluklarında karbonlu kompozit anot aktif maddelerin deşarj kapasitelerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum anot aktif maddelerin elektronik iletkenliklerinin artmasına bağlanılmaktadır. M-P anot aktif maddesinin deşarj kapasitelerinin M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddesinden daha düşük olması bileşikteki karbonun ağırlıkça yüzdesinin düşük olmasına bağlanmaktadır. Elektronik olarak yalıtkan olan M bileşiğinin karbon ve CNT kaplama ile iletkenliğinin artırılması elektrokimyasal özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur. Bu ise elektrokimyasal şarj-deşarj esnasında lityum difüzyon yolunun kısalmasına, elektronik iletkenliğin ve yüzey alanının artmasına bağlanabilir [17]. M-S-P-C anot aktif maddesinin elektrokimyasal performansının diğer anot aktif maddelere göre daha iyi olması iki farklı karbon türünün sinerjik etkisi ve daha homojen karbon dağılımına bağlanabilir.



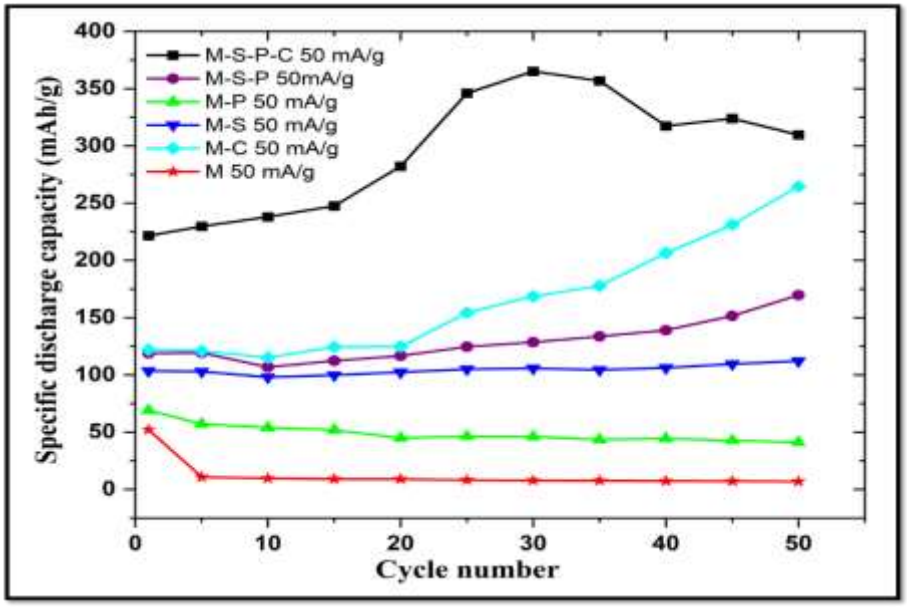
Şekil 9. M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50,100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunlukları ve 0.01-3 V potansiyel aralığında deşarj kapasiteleri

Şekil 9'da döngü sayısına göre farklı akım yoğunluklarında (50, 100, 200, 500 ve 1000 mA/g) deşarj kapasite değerleri görülmektedir. M-S-P-C anot aktif maddenin tüm akım yoğunluklarında en yük deşarj kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Özellikle 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında anot aktif maddenin deşarj kapasitesinin sırası ile 100 mAh/g ve 80 mAh/g olması elektrokimyasal performansının iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca 1000 mA/g akım yoğunluğundan sonra 50 mA/g akım yoğunluğunda ulaşılan deşarj kapasiteleri karşılaştırıldığımda kapasite kayıp oranın en az M-S-P-C anot aktif maddede olduğu bulunmuştur. Bu durum M-S-P-C anot aktif maddenin tersinmez deşarj kapasite kaybının en düşük olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.

Şekil 10'da M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50,100, 200, 500 ve 1000 mA/g akım yoğunluklarında 50 döngü sonunda 50 mA/g akım yoğunluğunda 0.01-3.0 V potansiyel aralığında deşarj kapasite değişim grafikleri görülmektedir.

Şekil 10'da M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin kapasite korunumun olduğu fakat saf M anot aktif maddenin deşarj kapasite kaybı olduğu kapasitenin korunmadığı bulunmuştur. M-C ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin deşarj kapsitelerinin döngü sayısına göre artışı aktif maddelerin elektrokimyasal şarj-deşarj sürecinde lityum iyon difüzyon yollarının açılmasına ve elektrolit ile temas bölgelerinin döngü esnasında armasına bağlanılabilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ağırlıkça %100 sakkaroz, %200 PEG ve %10 CNT ile hazırlanan ve toplam ağrlıkça %29.2 karbon içeren anot aktif maddenin lityum pil uygulamaları için grafit yerine alternatif anot aktif madde olarak ticari kullanılabilme potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 10. M, M-S, M-C, M-S-P ve M-S-P-C anot aktif maddelerinin 50 mA/g akım yoğunluğunda ve 0.01-3 V potansiyel aralığında 50 döngüdeki deşarj kapasiteleri

Teşekkür

Bu araştırmanın yapılmasına 2209/B üniversite öğrencileri sanayiye yönelik araştırma projeleri desteği programı kapsamında 1139B412304065 numaralı proje ile katkı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederiz.

Referanslar

[1] J. M. Tarascon and M. Armand, Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, Vol. 414, pp. 359–367, 2001.
[2] N. Yan, L. Hu, Y. Li, Y. Wang, H. Zhong, X. Hu, X. Kong, and Q. Chen, Co_3O_4 nanocages for high-performance anode material in lithium-ion batteries, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 116, pp. 7227–7235, 2012.
[3] J. N. Spinner, V. Zhang, and W. Mustain, Investigation of metal oxide anode degradation in lithium-ion batteries via identical-location TEM, *J. Mater. Chem. A*, Vol. 2, pp. 1627-1630, 2014.
[4] F. D. Wu and Y. Wang, Self-assembled echinus-like nanostructures of mesoporous CoO nanorod@CNT for lithium-ion batteries, *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, pp. 6636–6641, 2011.
[5] P. Poizot, S. Laruelle, S. Grugeon, L. Dupont, and J. M. Tarascon, Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries, *Nature*, Vol. 407, pp. 496–499, 2000.
[6] M. Zhang, M. Q. Jia, Y. H. Jin, and X. R. Shi, Synthesis and electrochemical performance of CoO/graphene nanocomposite as anode for lithium ion batteries, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 263, pp. 573–578, 2012.
[7] Z. S. Wu, W. C. Ren, L. Wen, L. B. Gao, J. P. Zhao, Z. P. Chen, G. M. Zhou, F. Li, and L. M. Cheng, Graphene anchored with Co_3O_4 nanoparticles as anode of lithium ion batteries with enhanced reversible capacity and cyclic performance, *ACS Nano*, Vol. 4, pp. 3187–3194, 2010.
[8] Y. Deng, L. Wan, Y. Xie, X. Qin, G. Chen, Recent advances in Mn-based oxides as anode materials for lithium ion batteries, RSC Adv. 4 (2014) 23914–23935, doi: 10.1039/c4ra02686a

[9] Z. Cao, M. Qin, B. Jia, L. Zhang, Q. Wan, M. Wang, A .A . Volinsky, X. Qu, Facile route for synthesis of mesoporous Cr2O3 sheet as anode materials for Li-ion batteries, Electrochim. Acta 139 (2014) 76–81, doi: 10.1016/j.electacta.2014.06. 160 .

[10] A. Kraytsberg, A critical review-promises and barriers of conversion electrodes for Li-ion batteries, (2017) 1907–1923. doi:10.1007/s10 0 08-017-3580-9.

[11] X. Gui, G. Hao, W. Jiang, A comprehensive review of Cr, Ti-based anode mate- rials for Li-ion batteries, (2020) 1081–1099.

[12] H. Şahan, Lityum İyon Pillerde Katot Aktif Madde Olarak Kullanılan LiMn2O4 Bileşiğinin Elektrokimyasal Performansının Artırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.

[13] S. Yıldız et al, Multiwalled-Carbon-Nanotube-Modified Li2ZnTi3O8 as Anode with Improved Cycling Stability and Rate Capability for Lithium-Ion Batteries 2024 ECS Adv. 3 020501DOI 10.1149/2754-2734/ad3769

[14] G.N Suresh babu., N. Kalaiselvi MnCr2O4/graphene composite as a high-performance anode material for lithium-ion batteries, Electrochimica Acta, 372, 137855, 1-9, 2021.

[15] Z. Zhang, H. Zhao, Z. Zeng, C. Gao, J. Wang, Q. Xia Hierarchical architectured NiS @ SiO_2 nanoparticles enveloped in graphene sheets as anode material for lithium ion batteries, Electrochim. Acta., 155 (2015), pp. 85-92.

[16] Y.M. Lee, J.Y. Lee, H.-T. Shim, J.K. Lee, J.-K. Park SEI layer formation on amorphous Si thin electrode during precycling J. Electrochem. Soc., 154 (2007), p. A515.

[17] L.Y. Yang, H.Z. Li, J. Liu, S.S. Tang, Y.K. Lu, S. Te Li, J. Min, N. Yan, M. Lei, Li4Ti5O12 nanosheets as high-rate and long-life anode materials for sodium-ion batteries, J. Mater. Chem. A., 3 (2015), pp. 24446-24452.