MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

3D YAZICI İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER TAKVİYELİ PET KOMPOZİT MALZEMELERİNDE DELİK DELME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI VE OPTİMİZASYONU

HAMİD HUSEYNLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi BARKIN BAKIR

EŞ-DANIŞMAN
Doç. Dr. SELİM HARTOMACIOĞLU

İSTANBUL, 2026

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

3D YAZICI İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER TAKVİYELİ PET KOMPOZİT MALZEMELERİNDE DELİK DELME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI VE OPTİMİZASYONU

HAMİD HUSEYNLİ
523223921

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi BARKIN BAKIR

EŞ-DANIŞMAN
Doç. Dr. SELİM HARTOMACIOĞLU

İSTANBUL, 2026

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans HAMİD HUSEYNLİ'nin "3D Yazıcı ile Üretilen Karbon Fiber Takviyeli PET Kompozit Malzemelerinde Delik Delme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması ve Optimizasyonu" başlıklı tez çalışması, 8 Temmuz 2026 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Adı SOYADI (Danışman)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Doç.Dr. Adı SOYADI (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Adı SOYADI (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun /07/2026 tarih ve sayılı kararı ile HAMİD HUSEYNLİ'nin Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, 3D yazıcı ile üretilen karbon fiber takviyeli PET kompozit malzemelerinde delik delme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmış ve Taguchi yöntemi ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında PET ve karbon fiber takviyeli PET malzemelerinden üretilen numuneler üzerinde farklı delik delme parametreleri uygulanmış; elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları değerlendirilerek optimum işlem koşulları belirlenmiştir.

Tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe, yönlendirme ve desteklerini esirgemeyen, akademik katkılarıyla çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın yürütülmesi ve geliştirilmesi sürecinde değerli görüşleri, bilimsel katkıları ve destekleriyle bana yardımcı olan ikinci danışmanım Doç. Dr. Selim HARTOMACIOĞLU hocama teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesine maddi destek sağlayan Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAPKO) teşekkür ederim. Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 11409 proje numarası ile desteklenmiştir.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, bugünlere gelmemde büyük emekleri olan sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Çalışma sürecimde yanımda olan, desteklerini ve dostluklarını her zaman hissettiğim arkadaşlarıma, hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla,

TEMMUZ, 2026 **HAMİD HUSEYNLİ**

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iii**

ABSTRACT ..... **iv**

SEMBOLLER ..... **v**

KISALTMALAR ..... **vi**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**

TABLO LİSTESİ ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. LİTERATÜR İNCELENMESİ **3**

2.1. Katmanlı Üretim Teknolojisi 3

2.2. Pet Ve Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler 6

2.2.1. Kompozit malzemelerin genel tanımı 6

2.2.2. Karbon Fiber Takviyeleri ve PET (Polietilen Tereftalat) Polimerinin Yapısı ve Özellikleri 7

2.3. Delik Delme İşlemi ve İşleme Parametreleri 9

2.3.1. Delik Delme İşleminin Genel Tanımı 9

2.3.2. Kompozit Malzemelerde Delme İşlemine Özgü Problemler 10

2.3.3. Delme İşleminde Kullanılan Takım Tipleri ve Geometrileri 12

2.3.4. İşleme Parametreleri 13

2.3.5. Literatürde Sıklıkla Kullanılan Parametre Setleri ve Bulgular 13

2.3.6. 3D Yazıcıyla Üretilen Kompozitlerde Delik Delme Özellikleri 17

2.3.7. Genel Değerlendirme ve Literatür Boşlukları 17

2.4. Optimizasyon Yöntemleri 18

2.4.1. Delik Delme İşleminde Optimizasyon İhtiyacı 18

2.4.2. Deneysel Tasarım Yöntemleri 19

2.4.3. Taguchi Yöntemi 19

2.4.4. Varyans Analizi – ANOVA 20

2.4.5. Yanıt Yüzeyi Yöntemi - RSM 21
3. MATERYAL ve YÖNTEM 23
3.1. Kullanılan Malzeme 23
3.2. 3D Baskı Süreci 24
3.2.1. Baskı Parametreleri 24
3.2.2. Numune üretimi 26
3.3. Delik Delme Deneyleri 27
3.3.1. Matkap Ucu Seçimi 28
3.3.2. Kesme Parametreleri (İlerleme, Devir vb.) 29
3.4. Çekme Testi 30
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 31
5. SONUÇ ve ÖNERİLER 47
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 55

ÖZET

3D YAZICI İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER TAKVİYELİ PET KOMPOZİT MALZEMELERİNDE DELİK DELME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI VE OPTİMİZASYONU

Hafiflik, yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi kritik beklentiler, havacılık, otomotiv, biyomedikal ve elektronik gibi önde gelen sektörleri yeni malzemeler aramaya yöneltmiştir. Bu bağlamda, karbon fiber takviyeli kompozitler, üstün termal, elektriksel ve mekanik avantajları sayesinde modern üretim endüstrilerinde önemli bir yer edinmiştir. Her üretim sürecinin merkezinde yer alan delme işlemleri, bu gelişmiş kompozit yapılarla uğraşırken zorlu bir görev haline gelir. Özellikle 3D baskı (katmanlı üretim) teknolojisi kullanılarak üretilen saf PET ve PET-CF15 kompozitlerinin işlenmesi, malzemenin benzersiz mikro yapısını anlamak ve işleme sırasında yapısal kusurları önlemek için deneysel inceleme gerektirir. Bu çalışmada, 3D baskı ile üretilen PET ve PET-CF15 malzemelerinin delik delme işlemindeki işlenebilirlik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında yüzey pürüzlülüğü (R_a), kesme kuvveti (F_t) ve çekme testi sonuçları nicel olarak değerlendirilmiş; delaminasyon ve delik çevresi hasarları ise SEM/görsel incelemeler kapsamında ele alınmıştır. Deneysel süreçte, temel giriş parametreleri olarak takım hızı, ilerleme hızı seçilmiştir. Tüm delme işlemleri, herhangi bir soğutucu kullanılmadan bir CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. İdeal delme özelliklerini elde etmek için deneyler Taguchi ortogonal dizisine göre tasarlanmış ve parametrelerin sonuçlar üzerindeki etki oranları ANOVA (Varyans Analizi) kullanılarak doğrulanmıştır. Elde ettiğimiz veriler, malzeme türü ve takım hızının yüzey pürüzlülüğü gibi kalite çıktısı üzerinde belirleyici faktörler olduğunu göstermiştir. Taguchi analizi sonucunda, yüzey pürüzlülüğünü minimize eden optimum delme parametreleri saf PET malzemesi için 1500 rpm takım hızı ve 1200 mm/dak ilerleme hızı, PET-CF15 malzemesi için ise 1500 rpm takım hızı ve 400 mm/dak ilerleme hızı olarak belirlenmiştir. Deneysel analizlerimiz, doğru işleme parametreleri seçildiğinde üretim kalitesinin ne kadar iyileştirilebileceğini açıkça göstermektedir. Özetle, bu çalışma PET ve PET-CF15 kompozit malzemeler üzerinde delik delme işlemleri için ideal parametre sınırlarını ortaya koymakta ve malzemenin gelişmiş üretim süreçlerindeki endüstriyel uygulamalar için yol gösterici deneysel veriler sunmaktadır.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF HOLE DRILLING PARAMETERS IN CARBON FIBER REINFORCED PET COMPOSITE MATERIALS PRODUCED BY 3D PRINTING

Critical expectations such as lightness, high strength, and low cost have driven leading sectors like aerospace, automotive, biomedical, and electronics to seek new materials. In this context, carbon fiber reinforced composites have gained a significant place in modern manufacturing industries thanks to their superior thermal, electrical, and mechanical advantages. Drilling operations, which are central to every manufacturing process, become a challenging task when dealing with these advanced composite structures. In particular, the processing of pure PET and PET-CF15 composites produced using 3D printing (additive manufacturing) technology requires experimental investigation to understand the unique microstructure of the material and prevent structural defects during processing. In this study, the machinability behavior of 3D-printed PET and PET-CF15 materials in hole drilling operations was experimentally investigated. Within the scope of the study, surface roughness (R_a), cutting force (F_a), and tensile test results were quantitatively evaluated; delamination and peri-hole damage were addressed within the scope of SEM/visual inspections. In the experimental process, tool speed and feed rate were selected as the basic input parameters. All drilling operations were performed on a CNC milling machine without the use of any coolant. To obtain the most ideal drilling characteristics, experiments were designed according to the Taguchi orthogonal array, and the dominance and influence ratios of the parameters on the results were validated using ANOVA (Analysis of Variance). Our data showed that material type and tool speed are decisive factors in quality output, such as surface roughness. As a result of the Taguchi analysis, the optimum drilling parameters that minimize surface roughness were determined as 1500 rpm tool speed and 1200 mm/min feed rate for pure PET material, and 1500 rpm tool speed and 400 mm/min feed rate for PET-CF15 material. Our experimental analyses clearly demonstrate how much production quality can be improved when the correct machining parameters are selected. In summary, this study reveals the ideal parameter limits for hole drilling operations on PET and PET-CF15 composite materials and provides guiding experimental data for industrial applications of the material in advanced production processes.

SEMBOLLER

a : Delaminasyon bölgesinin yatay uzunluğunu ifade eden geometrik ölçü

b : Delik çıkış bölgesindeki hasar/ölçüm genişliğini ifade eden geometrik ölçü

c : Matkap geometrisine bağlı kesme bölgesi ölçüsü

F_d : Delaminasyon faktörü

f : İlerleme hızı

H : Numune kalınlığı

h : Çapak yüksekliği

S : Devir hızı

F_t : Kesme kuvveti

R_a : Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü

T : İtme kuvveti

µm : Mikrometre

KISALTMALAR

AM : Eklemeli imalat

ANOVA : Varyans analizi

ASTM : American Society for Testing and Materials

CAD : Bilgisayar destekli tasarım

CF : Karbon fiber

CFRP : Karbon fiber takviyeli polimer kompozit

DLP : Digital Light Processing

FDM : Fused Deposition Modeling

GFRP : Cam fiber takviyeli polimer kompozit

GRA : Gri ilişkisel analiz

HSS : Yüksek hız çeliği

MRR : Malzeme kaldırma oranı

PET : Polietilen tereftalat

PET-CF15 : %15 karbon fiber takviyeli polietilen tereftalat

PLA : Polilaktik asit

PMC : Polimer matrisli kompozit

RSM : Yanıt yüzeyi yöntemi

S/N : Sinyal/gürültü oranı

SLA : Stereolitografi

SLS : Selective Laser Sintering

RPM : Dakikadaki devir sayısı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Eklemeli imalat teknolojisinin temel avantajları 3
Şekil 2. 2 (a) 3 boyutlu yazdırılmış delik ve (b) 3 boyutlu yazdırılmış ONYX/CGF kompozitinde geleneksel olarak delinmiş delik [4] 4
Şekil 2. 3 Eklemeli imalat proseslerinin imalat öncesi malzeme durumuna göre sınıflandırılması 4
Şekil 2. 4 FDM şeması [1] 5
Şekil 2. 5 CFRP kullanım alanları örneği [14] 6
Şekil 2. 6 PET CF - 15 Kompozit Malzemesini Makro Görünümü 8
Şekil 2. 7 PET CF - 15 Kompozit Malzemenin Mikroyapısal Görünümü 800x [26] 9
Şekil 2. 8 Delik Delme Seti 10
Şekil 2. 9 CFRP malzemesinde delinmiş deliğin mikroskobik görüntüsü 12
Şekil 2. 10 Helisel ağızlı matkabın giriş bölgesindeki delaminasyonu ve düzeltilmiş delaminasyon faktörü 14
Şekil 2. 11 Delaminasyon Faktörü için Kontur Grafiği 14
Şekil 2. 12 Delaminasyon analizi için dairesel plaka modeli (step drill) 17
Şekil 3. 1 Deney numunesinin teknik çizimi ve ölçüleri 27
Şekil 3. 2 Delme işlemi sırasında numunenin bağlama aparatı üzerine sabitlenmiş görünümü 28
Şekil 3. 3 Kistler veri toplama ve kayıt sistemi 28
Şekil 3. 4 Sandvik Coromant CoroDrill 460-XM 29
Şekil 3. 5 Çekme test cihazına yerleştirilmiş numunenin deney öncesi görünümü 30
Şekil 4. 1 PET ve PET-CF15 numunelerine ait kuvvet–uzama eğrilerinin malzeme bazlı ortalama değerleri ve ± standart sapma bantları 32
Şekil 4. 2 PET ve PET-CF15 numunelerine ait gerilme–uzama eğrilerinin malzeme bazlı ortalama değerleri ve ± standart sapma bantları 32
Şekil 4. 3 PET malzemesi 33
Şekil 4. 4 PET-CF15 malzemesi 33
Şekil 4. 5 Numune 2'ye ait delik çıkış bölgesi görüntüsü 35
Şekil 4. 6 Numune 4'e ait delik çıkış bölgesi görüntüsü 35
Şekil 4. 7 Numune 6'ya ait delik çıkış bölgesi görüntüsü 36
Şekil 4. 8 Numune 8'e ait delik çıkış bölgesi görüntüsü 36
Şekil 4. 9 Zygo optik profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü 37
Şekil 4. 10 Seçilmiş tekil Zygo yüzey pürüzlülüğü ölçüm örnekleri 38
Şekil 4. 11 PET ve PET-CF15 malzemelerinde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne

(Ra) etkisi 38
Şekil 4. 12 PET ve PET-CF15 malzemelerinde devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi 39
Şekil 4. 13 Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ana etki grafiği 41
Şekil 4. 14 İlerleme hızı ve devir sayısı için etkileşim grafiği 42
Şekil 4. 15 PET numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi ana etki grafiği 43
Şekil 4. 16 PET-CF15 numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi ana etki grafiği 45

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 MRR ve delaminasyon yüzdesi için deneysel bulgular [43] 15
Tablo 2. 2 Vijayan ve arkadaşlarının bulduğu arzu edilebilirlik değerleri 21
Tablo 3. 1 Saf PET ve PET-CF15 malzemelerinin temel özellikleri..... 23
Tablo 3. 2 Faktör ve Seviyeler..... 25
Tablo 3. 3 Deney tablosu 25
Tablo 4. 1 Zygo ölçümlerinden elde edilen seçilmiş tekil yüzey pürüzlülüğü (Ra) örnekleri 37
Tablo 4. 2 Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ANOVA sonuçları..... 40
Tablo 4. 3 PET numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi yanıt tablosu 43
Tablo 4. 4 PET numunesi için ortalama R_a değerlerine göre Taguchi yanıt tablosu 44
Tablo 4. 5 PET-CF15 numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi yanıt tablosu 45
Tablo 4. 6 PET-CF15 numunesi için ortalama R_a değerlerine göre Taguchi yanıt tablosu 46

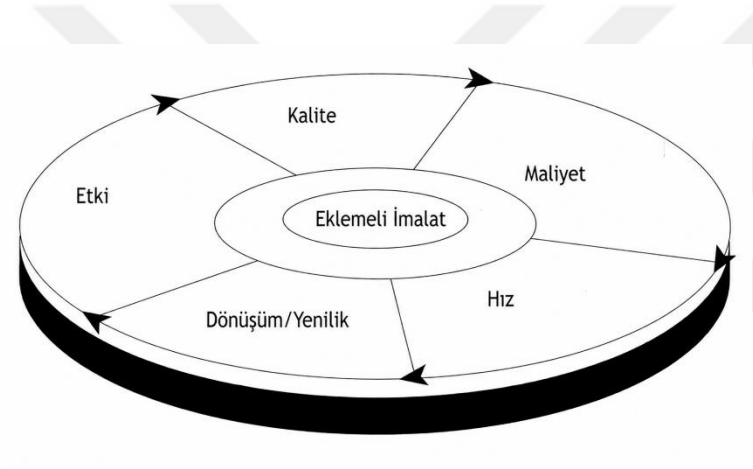
1. GİRİŞ

Son zamanlarda hafif, ucuz, dayanıklı ve yüksek mukavemetli malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu özelliklere sahip kompozit malzemeler, özellikle karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP), havacılık, otomotiv, medikal, savunma gibi birçok endüstri alanında çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Eklemeli imalat (3D baskı) teknolojileri tornalama, frezeleme, kaynak gibi geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karmaşık geometrileri olan parçaların üretimini daha hızlı, ekonomik ve esnek hale getirmiştir. Tezimizde kullanılan polietilen tereftalat (PET) esaslı karbon fiber takviyeli kompozitler, yüksek sertlik ve mekanik dayanım, düşük ağırlık, iyi kimyasal direnci gibi özelliklerinden dolayı eklemeli imalat teknolojisinde üretim için kullanılan ideal malzemeler içinde yer almaktadır. Kompozit malzemeler, üretildikten sonra kullanılabilir hale getirilmesi için çeşitli işlemlerden geçirilir. Bu işlemlerden biri de delik delme işlemidir. Ancak, karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde delik delme işlemi gerçekleştirildiği zaman delaminasyon, yüzey bütünlüğünün, dairesellik ve silindirikliğin bozulması gibi birçok problem ortaya çıkabilir. Bu nedenle delik delme işlemi sırasında, takım ilerleme ve kesme hızı, kesme torku, kesici takım türü gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde incelenip seçilmesi gerekmektedir. Bu parametreleri optimum şekilde belirlememiz, daha güzel işleme kalitesini almamıza hem de takım aşınmasını ve enerji tüketimini minimize etmemize yardımcı olur. Bu çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen karbon fiber takviyeli PET kompozit malzemelerde delik delme işleminin deneysel olarak incelenmesi ve delme parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır. Tez kapsamında, belirlenen delik delme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon gibi kalite kriterleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Daha sonra optimizasyon teknikleri kullanılarak delik delme işlemi zamanı en optimum parametre ve ideal işleme koşulları ortaya konulmuştur. Çalışmada delik delme deneylerine ek olarak, 3D baskı ile üretilen PET ve PET-CF15 numunelerinin mekanik performanslarını karşılaştırmak amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiş ve malzeme türünün dayanım, rijitlik ve uzama davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın literatüre katkısı, 3D baskı ile üretilmiş karbon fiber takviyeli PET kompozitlerde delik delme sürecine dair deneysel veriler sunması ve optimum işleme parametrelerini belirleyerek sektörel uygulamalara rehberlik etmesi olacaktır. Tezin ilerleyen bölümlerinde, literatürde bu alanda yapılan çalışmalar ele alınacak, deneysel yöntemler detaylandırılacak ve elde edilen sonuçlar ışığında en uygun delik delme parametreleri belirlenecektir.

2. LİTERATÜR İNCELENMESİ

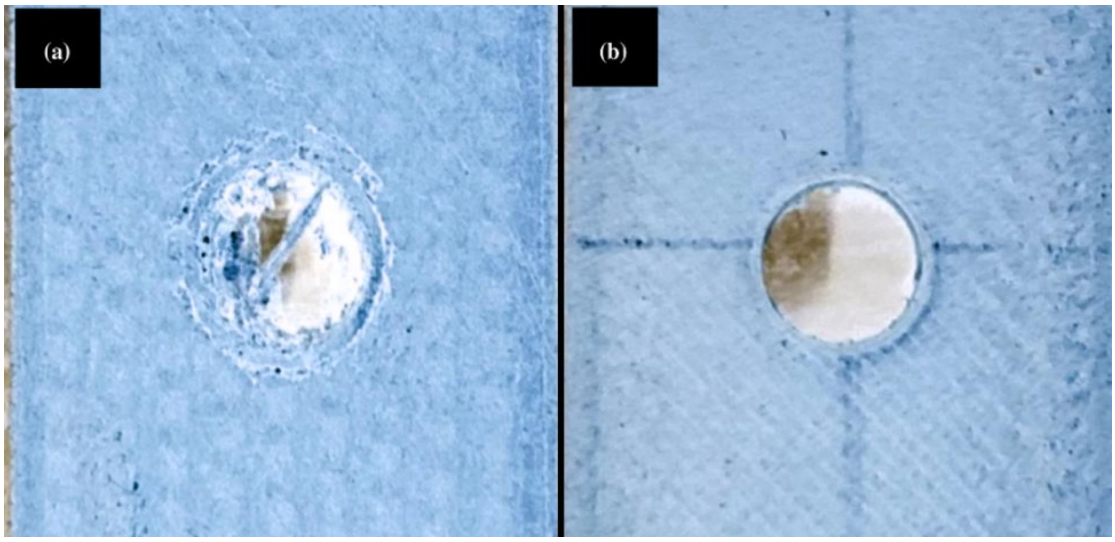
2.1. Katmanlı Üretim Teknolojisi

Geleneksel üretim yöntemlerinin sınırlılıkları, daha karmaşık geometrilerin üretilmesinde karşılaşılan zorluklar, üretim ve prototipleme aşamasında yaşanan zaman ve maliyet sorunları, eklemeli üretim teknolojilerinin geliştirilmesine yol açan başlıca faktörlerdir. Katmanlı üretim katman-katman malzeme biriktirerek parça üretme süreci olarak tanımlanabilir [1]. Bu teknoloji, 1980'li yıllardan itibaren özellikle prototipleme amacıyla kullanılmaya başlanmış, zamanla gelişen donanım ve yazılım altyapısıyla birlikte endüstriyel üretimde de yerini almaya başlamıştır. Katmanlı üretimin geleneksel üretime kıyasla 5 temel avantajı vardır: Maliyet, hız, kalite, yenilik/dönüşüm ve etki Şekil 2.1 [2].



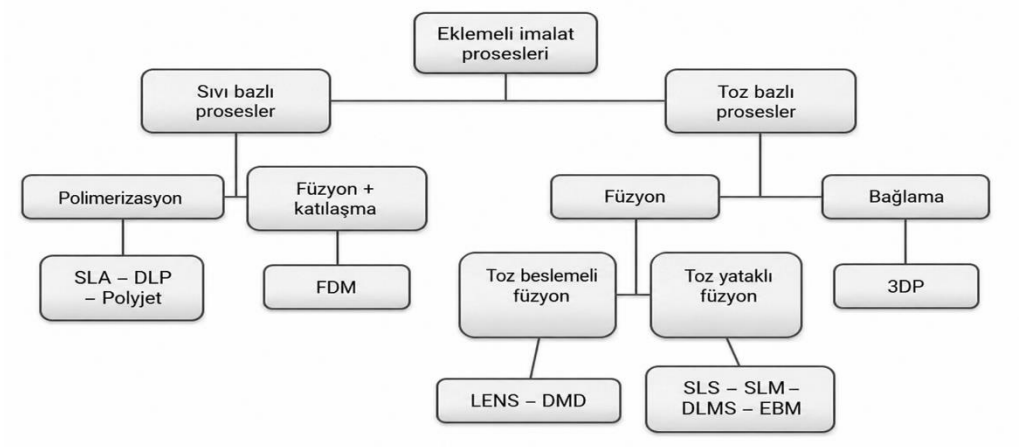
Şekil 2. 1 Eklemeli imalat teknolojisinin temel avantajları

Dijital ortamda tasarlanan geometrilerin hızlı, verimli ve ekonomik şekilde üretilebilmesi, bu yöntemin endüstriyel alanda yoğun talep görmesine neden olmuştur [3]. Ayrıca, geleneksel yöntemlerle imalatı zor ya da imkansız olan iç yapılar ve geometriler, 3D yazıcılar sayesinde kolayca ve daha düzgün bir şekilde üretilebilmektedir. Aşağıdaki resimde Gorrepotu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada bu daha net olarak gözükmektedir.



Şekil 2. 2 (a) 3 boyutlu yazdırılmış delik ve (b) 3 boyutlu yazdırılmış ONYX/CGF kompozitinde geleneksel olarak delinmiş delik [4]

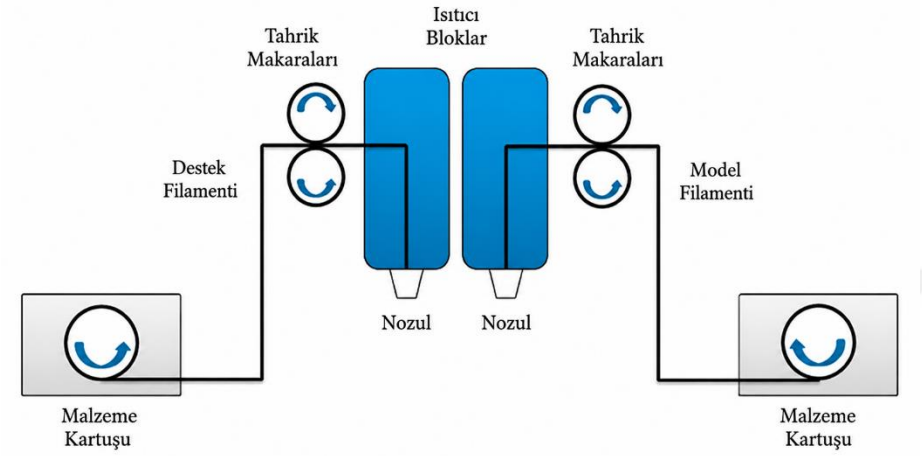
Günümüzde bir çok katmanlı üretim teknolojisi geliştirilmiştir ve her birinin kendisine özgün avantajları, dezavantajları vardır. Bununla birlikte, katmanlı üretim teknolojilerinin üretim sürecinin nispeten yavaş olması, tekrarlanabilirlik problemleri ve işlenebilir malzeme çeşitliliğinin sınırlı kalması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır [4]. Katmanlı üretim teknolojileri arasında Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) ve Digital Light Processing (DLP) gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Şekil 2.3'te eklemeli imalat proseslerinin imalat öncesi malzeme durumuna göre sınıflandırılması gösterilmiştir [5].



Şekil 2. 3 Eklemeli imalat proseslerinin imalat öncesi malzeme durumuna göre sınıflandırılması

Akademik çalışmamızda kullanılan üretim yöntemi; FDM (Fused Deposition Modeling)

olup, termoplastik filamentlerin eritilerek belirlenen eksenlerde katman-katman halinde biriktirmek prensibiyle çalışmaktadır. Fused Deposition Modeling 1991 yılında Stratasys tarafından tanıtılmıştır [6]. FDM yöntemi bir alt tabaka üzerine tel şeklinde termoplastik malzemeyi eritip katman-katman biriktirmek için bir ekstrüzyon nozulu kullanan termal işlemdir [7]. Bu yöntemin yaygın kullanılmasının en başlıca nedeni işlevsel parçalar üretme yeteneği ve ofis dostu bir ortamda kullanım kolaylığıdır [5].

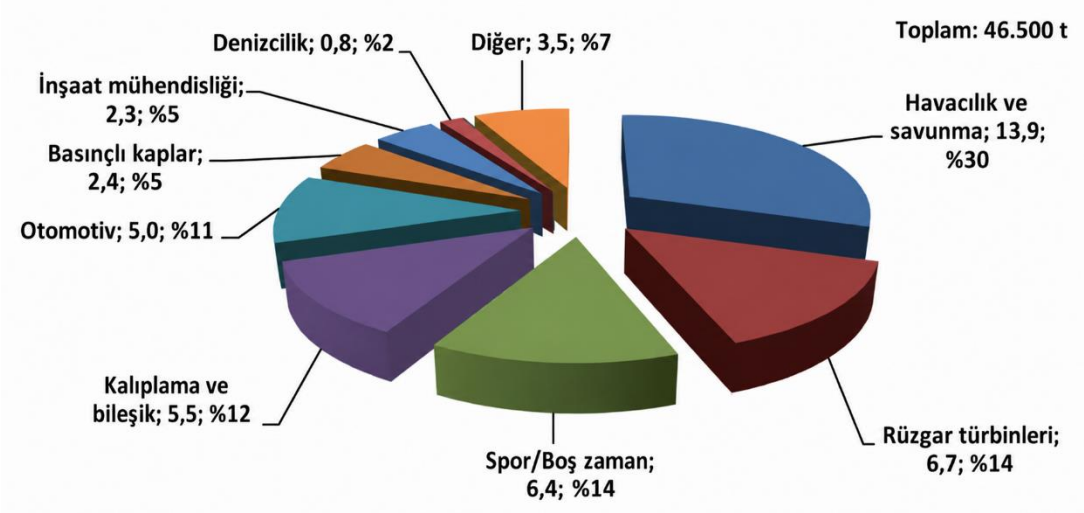


Şekil 2. 4 FDM şeması [1]

Literatürde daha önce yapılmış çalışmalara dayanarak üretim aşamasında birkaç parametrenin yapı parçası özellikleri ve üretim verimlilikleri üzerinde baskın bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. En önemli faktörlerden bazıları katman kalınlığı, raster açısı, yapı yönü, baskı hızı, dolgu deseni, ekstrüzyon sıcaklığı, nozul çapı, kontur genişliği, vb.'dır [8]. Katman kalınlığı olarak bilinen faktör her bir baskı katmanının yüksekliğini belirler. Daha ince katmanlar, daha pürüzsüz yüzeyler ve detaylı baskılar sağlarken, daha kalın katmanlar baskı süresini kısaltarak, yüzey kalitesini düşürebilir. Yanping Liu, DDS ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada baskı katmanı kalınlığının 3D baskı yöntemi ile üretilen tepsilerin mekanik özelliklerindeki etkisini incelemiştir. Katman kalınlığındaki artış tepsilerin mukavemetinde azalmasına, zaman verimliliğinin artmasına neden olmuştur [9]. Raster açısı üretim aşamasında liflerin serildiği yönü belirler ve malzemenin mukavemet, elastisite modulünü önemli ölçüde etkiler. Örneğin, 0° raster açısında üretilmiş malzeme 90° açıda üretilmişten daha dayanıklıdır. Skhandesh Srinivasan Ganesh Iyer ve Ozgur Keles çalışmalarında 3D baskılı kısa karbon fiber takviyeli akrilonitril bütadien stirenin mekanik özellikleri üzerinde raster açısının etkisini incelemişler. Deney sonucu; raster açısının malzemenin tüm mekanik özelliklerini etkilediği ortaya çıkmıştır [10]. Yapı yönü diye geçen diğer faktörün

Madhuri Chaudhari ve başkalarının yaptığı araştırmada yüzey pürüzlülüğünü etkilediği belirlenmiştir. Bu araştırma, yüzey pürüzlülüğünün en düşük seviyeye ulaşması için YZ yöneliminde, %100 doluluk oranı ve 0.30 mm katman kalınlığıyla baskının en uygun sonucu verdiğini göstermektedir. Ayrıca, XY yöneliminde, 0.30 mm katman kalınlığı ve %20 doluluk oranı üretim süresini azaltmada etkili olmuştur [11]. Sırasıyla diğer parametreler de malzemenin mekanik dayanıklılığını azalta ve ya daha dayanıklı yapabilir.

Son yıllarda FDM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla takviye malzemeleriyle modifiye edilmiş filamentler geliştirilmiştir. Tüm takviye edici lifler arasında, karbon lifler daha yüksek dayanım ve mukavemet sunar. Bu lifler organik liflerin aksine, stres altında kırılmaz ve yüksek elektriksel, termal iletkenlikler sunar. Bu yüzden karbon lifler özellikle havacılık, otomotiv sektörlerinde daha çok kullanılmaktadır [12].



Şekil 2. 5 CFRP kullanım alanları örneği [14]

Karbon fiber gibi yüksek dayanımlı takviyeler, özellikle yapısal uygulamalarda tercih edilmekte, bu sayede katmanlı üretimle elde edilen ürünlerin performansı artırılmaktadır. Bu bağlamda, 3D yazıcılar sadece prototipleme değil, fonksiyonel parça üretimi açısından da önem kazanmaktadır.

2.2. Pet Ve Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

2.2.1. Kompozit malzemelerin genel tanımı

Kompozit malzemelerin insanlık tarafından üretilmesi ve kullanılması, bilinen en eski kompozitlerden biri olan saz ve kerpicin duvar yapımında yapı malzemesi olarak

kullanıldığı 6000 yıl öncesine kadar uzanmaktadır [13]. Kompozit malzemeler, iki ve ya daha fazla farklı malzemenin makroskopik düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşan ve bu sayede tek başlarına sahip olamayacağı özelliklere sahip olan yapılardır. Kompozit malzemeler, elverişli özelliklerinden olan yüksek özgül mukavemet ve sertlik, farklı çevresel koşullara dayanıklılıkları gibi üstün nitelikleri nedeniyle birçok yapısal uygulamada yaygın olarak görülür [14]. Günümüzde havacılık, otomotiv, medikal, inşaat, spor ekipmanları gibi insan toplumunun farklı sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [13]. Üç tip kompozit malzeme vardır: matrise göre metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozit malzemeler [15]. Polimer matrisli kompozitler (PMC) diğer matrisli kompozitlere kıyasla, hafifliği, işlenebilirliği, korozyon direnci ve üretim kolaylığı gibi avantajlarıyla dikkat çekiyor. Bu kompozit malzeme, bir polimer matris ve lifli bir takviye edici fazın bir araya gelmesiyle oluşturuluyor. PMC-ler takviye elemanı olarak genellikle cam, karbon veya aramid fiberlerle desteklenerek mekanik dayanım, rijitlik ve termal kararlılık gibi özellikleri iyileştirilir [16]. Kompozit yapı sayesinde her iki bileşenin avantajları bir arada toplanabilir: matris fazı yük transferini sağlarken, fiber fazı mekanik dayanımın temel kaynağını oluşturur.

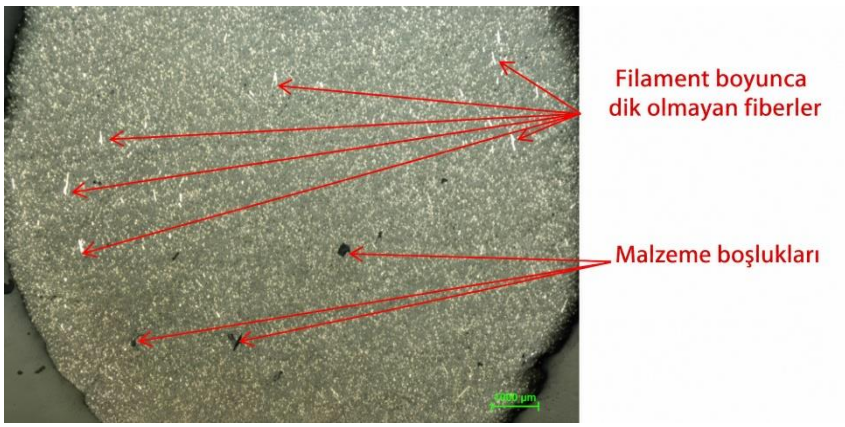
Son yıllarda, 3D yazıcı teknolojilerinin yaygın kullanma başlanmasıyla birlikte, özel parçaların üretiminde polimer esaslı kompozit malzemelerin kullanımı önem kazanmıştır. Daha önce belirttiğim gibi, katmanlı üretim teknolojisi, karmaşık geometriyi sahip yapıların diğer üretim teknolojileri ile kıyasla daha hızlı ve düşük maliyetle üretilmesini bize sunar. Bu kapsamda dikkat çeken önemli gelişmelerden biri de PET (polietilen tereftalat) matrisli karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanım alanı bulmasıdır. Bu tür kompozitler, hem endüstri hem de mühendislik uygulamaları için araştırmacılara önemli potansiyel sunmaktadır.

2.2.2. Karbon Fiber Takviyeleri ve PET (Polietilen Tereftalat) Polimerinin Yapısı ve Özellikleri

Karbon fiberler, binlerce yıldır pamuk ve keten gibi doğal selülozik liflerden istemeden de olsa elde edilmiştir [17]. Karbon fiberler, genellikle polimerik bir ön madde (PAN - poliakrilonitril) malzemelerin yüksek sıcaklıkta pirolizi ile üretilir [18]. Karbonlaşma işlemi sonucu, %90'dan fazla karbon içeriğine sahip kristalin yapıda ve lif formunda ürünler elde edilir. Karbon fiberler genellikle yüksek çekme dayanımına, yüksek termal ve kimyasal kararlılığa, iyi elektriksel iletkenliğe sahiptirler [19]. Örneğin Mengyu Cao

ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, karbon fiberin FDM ile üretilen PLA numunesinin çekme dayanımını araştırmışlar. Çekme testi sonuçlarına göre, karbon fiberlerin yüksek çekme dayanımı (>4000 MPa) ve elastisite modülü (200–800 GPa) sayesinde mükemmel mekanik performans sergilediği belirlenmiştir [20]. Uygulama zamanı karbon fiberlerin kısa veya sürekli olarak kullanımı gereken özelliklere uygun belirlenir. Kısa fiberler daha kolay işlenebilir ve filament üretiminde çok yaygın kullanılan formdur. Bu formla üretilen malzemenin mekanik özellikleri daha düşüktür. Sürekli fiberler ise daha üstün mekanik özellikler sunar ancak üretim ve yazım süreci daha karmaşıktır.

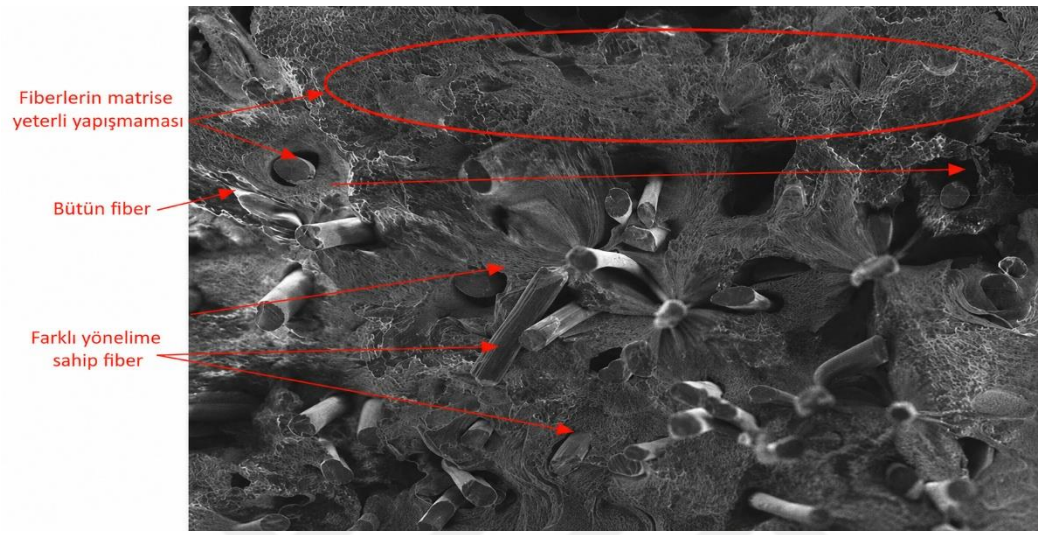
Polimer matrisli kompozit malzemelerde fiber kullanılarak mukavemet, yoğunluk oranının iyileştirilmesinden sonra metal parçaların yerine giderek daha fazla kullanılıyor [21]. Tez çalışmamızda kullanacağımız PET (Polietilen Tereftalat) kompozit malzemesi hafif, dayanıklı, çok yönlü özellikleri olduğundan drone yapımında, su şişeleri, gıda ambalajları ve tekstiller gibi ürünlerin üretiminde kullanılan yaygın bir plastiktir [22]. PET CF15, %15 karbon fiberle doldurulmuş polietilen tereftalattır ve matristeki lifler, düşük ağırlığı korurken daha fazla güç ve sertlik sağlar [23]. Aşağıdaki şekil 2.6 bizim de kullanacağımız olan PET CF-15 malzemesinin Madalina-Ioana Blaj ve başkalarının makalesinde yayınladığı makro görünümüdür. Makro görünüm incelemesi sonucunda PET-CF15 filamentinde, karbon fiberlerin matris içinde düzensiz dağılım gösterdiği ve belirli bölgelerde malzeme boşluklarının (voids) oluştuğu gözlemlenmiştir [24].



Şekil 2. 6 PET CF - 15 Kompozit Malzemesini Makro Görünümü

Kimyasal yapısı $[C_{10}H_8O_4]$n olan PET, etilen glikol ile tereftalik asit monomerlerinin polikondensasyonu yoluyla elde edilir. PET-in erime sıcaklığı yaklaşık 250 - 270 °C-dir ve bu değer FDM tipi 3D yazıcılarla işlenebilirliği açısından uygulamacılara geniş imkanlar sağlar. Geri dönüştürülebilir olması tekrar üretimi açısından önemli bir

avantajdır ve atıkların azaltılması, ekonomiye katkısı nedeniyle PET esaslı malzemeler çevre dostu malzemeler içerisinde yer almaktadır. PET-in 3D yazıcı teknolojilerinde kullanılması nedenlerinden biri de onun eritilip yeniden istenilen şekli alabilmesine göredir. Bu malzeme karbon fiber gibi takviye edici malzemeleriyle bir araya getirildiğinde mekanik özellikleri daha da gelişir.



Şekil 2. 7 PET CF - 15 Kompozit Malzemenin Mikroyapısal Görünümü 800x [26]

Ayrıca, elastisite modülü ve darbe dayanımı gibi parametrelerde de iyileşmeler görülmektedir. Bu durum, takviyeli PET malzemeleri mühendislik uygulamaları için daha kullanışlı hale getiriyor.

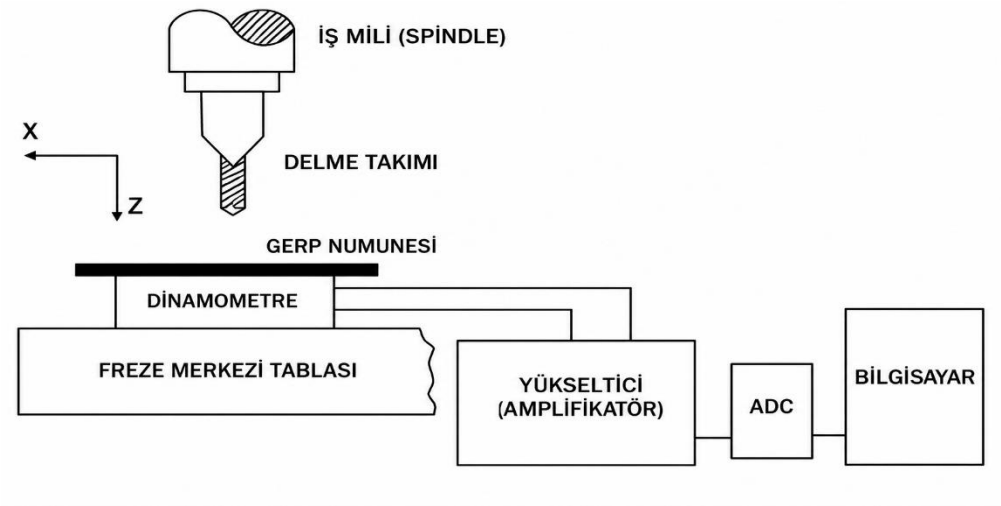
Tez çalışmasının bu bölümü, kompozit malzemelerin yapısal özellikleri, üretim teknikleri, mekanik davranışları ve işlenebilirlikleri literatürde olan daha önce yapılmış araştırmalara dayalı olarak detaylandırılmıştır.

2.3. Delik Delme İşlemi ve İşleme Parametreleri

2.3.1. Delik Delme İşleminin Genel Tanımı

Mühendislikte delik delme işlemi, istenmeyen malzemeleri çıkararak silindirik delik oluşturmak için kesici takım kullanıldığı bir işlem olarak tanımlanabilir [25]. Bu işlem geleneksel imalat yöntemleri sırasında yer alır ve metal, plastik, kompozit gibi malzemelerde uygulanıyor. Lazer işleme, su jeti ile işleme gibi geleneksel olmayan imalat yöntemleri kompozit malzemeler üzerinde geliştirilmiş olsa da, delik delme işlemi kompozit malzemeler için birincil uygulamalardır ve geleneksel delme, taşlama delme, yüksek hızlı delmeyi kapsar [26]. Kompozit malzemelerde delik delme işlemi, yapısal elemanların mekanik bağlantılarla birleştirilmesi gereken durumlarda büyük

önem taşımaktadır. Bu yüzden uçağın yapılarının montaj işleminde perçinli ve cıvatalı bağlantılar üretmek için milyonlarca deliğin gerekli olması nedeniyle delik delme kullanılır [27]. Deneysel kurulum şematik şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 8 Delik Delme Seti

Kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğü delik delme işlemi sırasında önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Literatürde geleneksel aletlerle bu malzemelerde delik delmenin kesme yüzeyinin kalitesine, kesme parametrelerine, alet geometrisine, alet malzemesine, iş parçası malzemesine, işleme sürecine önemli derecede bağlı olduğu bildirilmektedir [28]. Bu nedenle, delik delme işleminin optimize edilmiş parametrelerle yürütülmesi, istenmeyen hasarların önüne geçmek için en önemli unsurlardan biridir. Malzemenin anizotropik ve heterojen yapısı, işlem esnasında fiber çekilmesi, katman ayrılması (delaminasyon), matris çatlaması gibi istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilir.

2.3.2. Kompozit Malzemelerde Delme İşlemine Özgü Problemler

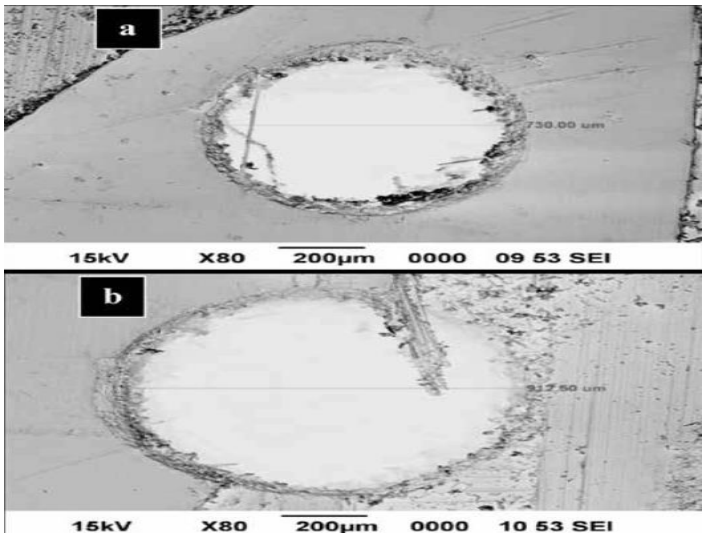
Kompozit malzemelerinin delme süreçlerinin modellenmesi ve optimizasyonu kompozit malzemelerin homojen olmayan, anizotropik yapısı nedeniyle karmaşık hale gelmektedir [29]. Delme işleminde yapılan uygulamalar zamanı en yaygın karşılaşılan problemler şu şekilde sıralanabilir:

- **Delaminasyon:** En kritik hasar türlerinden biridir. Çok yönlü kompozit malzemelerin delinmesinde, ilk kompozit tabakasının içinde oluşur. Daha sonra matkapın itme gücüyle katmanlar boyunca yayılır ve düzlem dışı hasar oluşturur

[30]. Katmanlar arası bağın zayıflaması malzemenin performansında düşüşe neden olabilir.

- **Yüzey Pürüzlülüğü:** Delme sırasında oluşan düzensizlik ve sürtünme, yüzey kalitesinin bozulmasına yol açar. Bu durum, bağlantı elemanlarının dayanımını olumsuz etkileyebilir.
- **Termal Hasar:** Kompozit malzemelerde kuru delme işlemleri sırasında, düşük ısı iletkenliğine sahip reçine yüksek sıcaklıklara maruz kalır, bu nedenle termal hasar ortaya çıkmatadır. Özellikle GFRP delik delme işlemlerinde, yüksek ilerleme hızlarında reçinenin kritik sıcaklık değerini aşması, malzeme yüzeyinde gözle görülür bozulmalara yol açmaktadır [31].
- **Takım Aşınması:** Diğer aşındırıcı malzemeler de olduğu gibi kompozit malzemeler de aşındırıcı yapıya sahiptir. Malzemede elyaf yönelimi, takım aşınmasını etkileyen önemli faktördür [32]. Bu durum, takım ömrünü kısaltır, verimliliği düşürür ve bir çok başka problemlere neden olur.

Kompozit malzemelerde, kesme ve ilerleme hızları, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon gibi kalite parametrelerinde çok önemli bir rol oynar. Örneğin, Shunmugesh ve Panneerselvam tarafından yapılan bir çalışmada, 2 mm kalınlığındaki CFRP laminatta 0,7, 0,8 ve 0,9 mm çapında delikler açılarak tabaka ayrılma katsayısı, yuvarlaklık ve silindiriklik incelenmiştir. Bu çalışmada optimizasyon yöntemleri olarak Taguchi, ANOVA ve GRA kullanılmıştır. ANOVA varyans analizi sonuçları, ilerleme hızı ve kesme hızının sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yüksek kesme ve düşük ilerleme hızları, tabaka ayrılma katsayısı, yuvarlaklık ve silindiriklik değerlerini düşürmektedir. Delinmiş deliğin mikroskobik görüntüsü Şekil 2.9'da gösterilmiştir [33].



Şekil 2. 9 CFRP malzemesinde delinmiş deliğin mikroskobik görüntüsü

Malzemelerin mekanik özelliklerini önemli şekilde etkileyen bu kalite sorunları, işlenmiş kompozit parçaların büyük oranda reddedilmesinin nedenidir [34].

2.3.3. Delme İşleminde Kullanılan Takım Tipleri ve Geometrileri

Kompozit malzemelerinde delik delme işlemi zamanı kullanılan matkap ucu türleri, işin kalitesini doğrudan etkileyen önemli unsurdur. Doğru matkap ucu türü kullanılmadığında yukarda belirtilen delme işlemine özgü problemler özellikle delaminasyon oluşmaktadır. Twist matkap uçları üretimde hızlı ve ekonomik deliklerin delinmesi için yaygın kullanılmaktadır [35]. Bu matkap uçlarının yanı sıra, kompozit malzemelerine özel olarak geliştirilen matkap uçları da vardır ve delaminasyonu azaltmak amacıyla özel geometrilere sahiptir.

- **Twist Matkap Ucu:** Literatürde en yaygın olarak kullanılan matkap ucu türüdür ancak kompozit malzemelerinde yüksek delaminasyon riski taşır.
- **Brad Matkap Ucu:** Kesim işleminden önce elyafları hafif şekilde gererek onların daha düzgün şekilde kesilmesini sağlamak üçün özel bir geometriye sahiptir. Delaminasyon riski nispeten düşüktür [36].
- **Dagger Matkap Ucu:** Yaklaşık 30 derecelik bir uç açısına sahiptir ve delme zamanı oluşabilecek girinti etkisini azaltır [36].
- **Step Matkap Ucu:** Ön delme (pilot delik) ve esas delme işlemini tek adımda gerçekleştirerek, kesme kuvvetini kademelere ayırır. Delik girişinde daha küçük bir çapla başlayarak ilerlediği için delaminasyonu azaltır [36].

- **Orbital Drilling:** Kesme kuvvetlerini azaltmak amacıyla kullanılan alternatif bir yöntemdir. Takım yörüngesel hareketle ilerler.

Matkap ucunun açısı, kesme kenarı uzunluğu ve uç geometrisi gibi faktörler, delinen deliğin kalitesini ve takım ömrünü belirleyen önemli parametrelerdendir. Endüstride yüksek hızlı çelik ve sementit karbür matkaplar polimerik kompozit malzemelerde delik delme işlemi zamanı yaygın olarak kullanılır [37].

2.3.4. İşleme Parametreleri

Delik delme işleminin kalitesi, başarısı uygulanan işlem parametrelerinin doğru seçilmiş olmasına bağlıdır. En çok dikkat edilmesi gereken parametreler şunlardır:

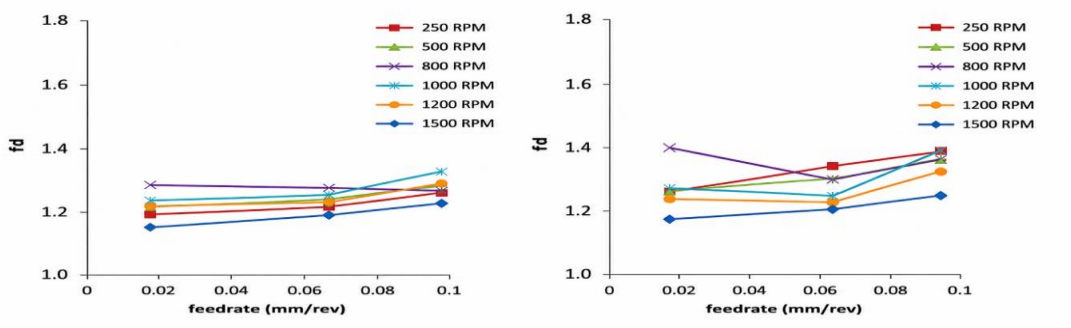
- **Kesme Hızı (V):** Takımın ve matkapın çevresel hızıdır. Literatürde yapılan çalışmalar sonrası yüksek kesme hızlarının düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu ortaya çıkmıştır. Dezavantajı yüksek kesme hızı takım ömrünü kısaltabilir.
- **İlerleme Hızı (f):** Bir tam devirde takımın ilerlediği mesafe ilerleme hızı olarak isimlendirilir. Düşük ilerleme hızı malzeme katmanları arasında delaminasyonu azaltırken, takım aşınmasını da en aza indirebilir.
- **Soğutma ve Yağlama:** Çelik ve diğer malzemelerden farklı olarak kompozit malzemelerde genellikle kuru delme işlemi gerçekleştirilir. Ancak bazı durumlarda hava soğutma ve yağlama uygulanabilir. Epoksi bazlı kompozitlerde su bazlı yağlamanın yüzey pürüzlülüğünü azalttığını bulunmuş, ancak PET-CF15 gibi yeni nesil malzemelerde bu bulguların genellenebilirliğini araştırılmamıştır [38].
- **Delme Stratejileri:** Ön delik açma (pilot delik), peck drilling, çok kademeli delik delme gibi yöntemler, işlem kalitesini arttırıyor.

İşleme parametrelerinin uyumsuz seçimi işlem yapılan malzemede delaminasyon oranını artırmakta, yüzey pürüzlülüğünü ve mekanik dayanımı düşürmektedir. Bu nedenle optimum parametre kombinasyonunun seçimi literatürde büyük önem arz etmektedir.

2.3.5. Literatürde Sıklıkla Kullanılan Parametre Setleri ve Bulgular

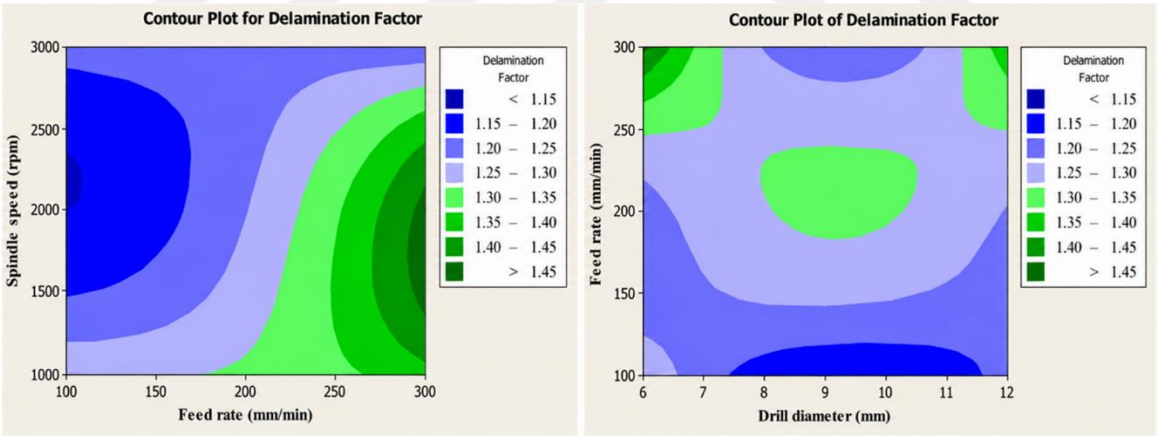
Literatürde daha önce yapılan araştırmalarda, genellikle ilerleme ve kesme hızı, matkap ucu tipi ve takım aşınması gibi parametreler üzerinde durulmaktadır. Farklı çalışmalarda

elde edilen sonuçlar, bu parametrelerin malzemeler üzerinde etkilerini anlamada yardımcı olmaktadır. Örneğin, Kumar ve ekibi, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde farklı matkap geometrilerinin etkilerini incelemiş ve özellikle helisel ağızlı matkapların delaminasyonu arttırdığını göstermiştir [39].



Şekil 2. 10 Helisel ağızlı (HSS) matkabın giriş bölgesindeki delaminasyonu ve düzeltilmiş delaminasyon faktörü

Panneerselvam ve arkadaşları ise sisal-cam fiber takviyeli polimerlerde delik delme sırasında, yüksek hız ve düşük ilerleme oranlarının en iyi sonuçları verdiğini belirtmiştir [40].



Şekil 2. 11 Delaminasyon Faktörü için Kontur Grafiği

Başka bir çalışmada N.Sneha ve arkadaşları PLA %14 ağırlıkta Bronz kompozit filament malzemesinde delik delme işlemi gerçekleştirmiş ve malzeme kaldırma oranı, delaminasyonu araştırmışlar. Deney prosedürünün tasarımı için RSM tekniği, parametreleri kontrol etmek ve istenilen koşulları optimize etmek için en uygun yöntem olduğu anlaşılmıştır. Talaş kaldırma oranı (MRR) ve delaminasyon etkisi karşılaştırılarak, farklı çaplara sahip matkap uçları (0.5, 0.7, 0.9) ile yapılan kesim genişliği açısından devir sayısı ve ilerleme oranları optimize edilmiştir. 20 koşuda

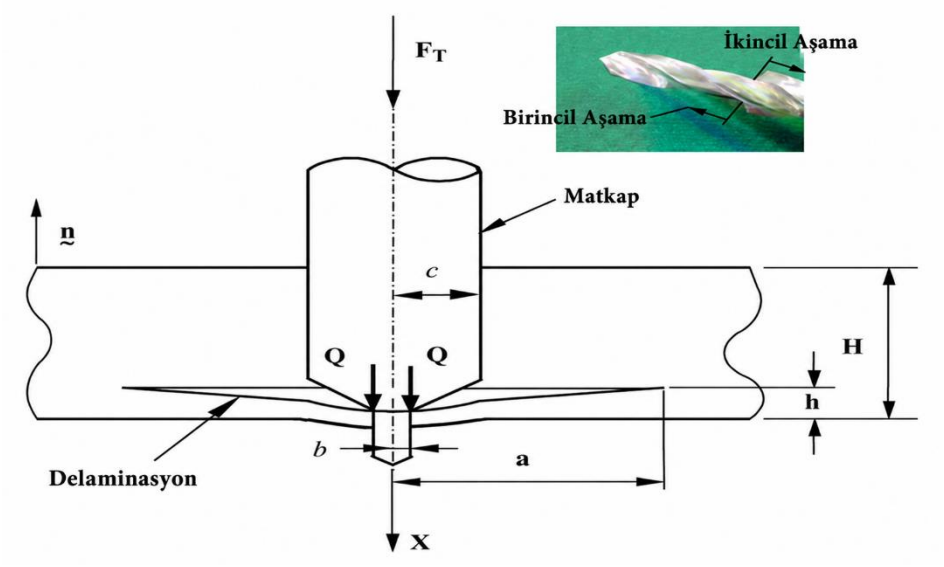
yapılan deneyler sonucunda, maksimum materyal çıkarma oranı 1.1842, maksimum delaminasyon etkisi ise 1.3185 olarak belirlenmiştir. Bu yöntem, delaminasyonu en aza indirirken, en uygun matkap ucu koşullarını belirlemeye yardımcı olmaktadır [41].

Tablo 2. 1 MRR ve delaminasyon yüzdesi için deneysel bulgular [43]

Deney. No.	Çap (mm)	Takım Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm/min)	Materyal Çıkarma Oranı (gm/min)	Delaminasyon (%)
E1	0.9	2000	0.1	0.7559	1.2055
E2	0.7	2500	0.3	0.5243	1.097
E3	0.9	3000	0.1	0.861	1.263
E4	0.7	2500	0.2	0.4578	1.086
E5	0.7	2500	0.1	0.3673	1.082
E6	0.5	2500	0.2	0.2843	1.241
E7	0.5	3000	0.1	0.2208	1.166
E8	0.5	3000	0.3	0.266	0.9831
E9	0.7	2500	0.2	0.4578	1.086
E10	0.5	2000	0.2	0.2092	1.127
E11	0.5	2000	0.3	0.2409	1.118
E12	0.9	2500	0.2	0.9741	1.268

Deney. No.	Çap (mm)	Takım Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm/min)	Materyal Çıkarma Oranı (gm/min)	Delaminasyon (%)
E13	0.7	2500	0.2	0.3649	1.045
E14	0.9	3000	0.3	1.1842	1.3185
E15	0.7	2000	0.2	0.4517	1.101
E16	0.7	3000	0.2	0.4609	1.085
E17	0.9	2000	0.3	1.0982	1.277
E18	0.5	2500	0.2	0.2843	1.1214
E19	0.5	3000	0.2	0.2757	1.233
E20	0.5	2500	0.3	0.3246	1.2373

N.S Mohan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada kompozit malzemelerinin delinmesinde delaminasyon analizini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalarında, ilerleme hızı, kesme hızı ve malzeme kalınlığının kompozit malzemelerinin delinmesinde delaminasyonu etkileyen parametreler olduğunu bulmuşlardır [42]. Başka bir çalışmada E.Kilickap Taguchi yöntemi ve ANOVA sonuçlarına göre, kesme hızı ve ilerleme oranının en iyi kombinasyon seviyeleri, düşük kesme parametresi seviyelerinde elde etmiştir [43]. Hocheng ve Tsao, step matkap uçlarının şekil 2.12 delaminasyonu önemli ölçüde azalttığını ve kompozitlerde delik delme işlemini gerçekleştirmek için ideal takım geometrisi olduğunu vurgulamışlardır [44] .



Şekil 2. 12 Delaminasyon analizi için dairesel plaka modeli (step drill)

Yapılan birçok araştırmalarda, Taguchi yöntemi veya ANOVA varyasyon analizi ile deneysel veriler değerlendirilmekte ve optimum işleme parametreleri belirlenmektedir. Bu tür yöntemler, tekrarlamaları azaltmakta ve doğru sonuçlar elde etmek açısından araştırmacılara büyük avantaj sağlamaktadır.

2.3.6. 3D Yazıcıyla Üretilen Kompozitlerde Delik Delme Özellikleri

3D yazıcılarla üretilen kompozit malzemelerde yapılan delik delme işlemi, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen kompozitlerde delik delme işleminden farklılık göstermektedir. Uygulama sürecinde kullanacağımız %15 karbonlu PET gibi termoplastik matrisli malzemelerde, katmanlı üretim ile yapısal yapı içerisinde oluşan mikro boşluklar ve katmanlar arası zayıf lif bağları, delik delme işlemi ile birlikte farklı tipte hasarlara neden olabilir. Delaminasyon miktarı ve yönü, delme işlemi sırasında kaç adet lifin kesileceğini etkileyen iç yapının yönelimine göre katmanlı üretilen malzeme için önemlidir. Bu teknik, geleneksel olana göre daha az izotropik ve daha düşük yoğunluklu kompozitler ile sonuçlanır. Dolayısıyla bu kavramları doğrulamak için bu tür 3D baskılı malzemeler için delik delme işleminde kullanılan parametrelerin optimize edilmesi ve farklı stratejilerin geliştirilmesi gerekir.

2.3.7. Genel Değerlendirme ve Literatür Boşlukları

Kompozit malzemelerde daha önce yapılan delik delme işlemi ile ilgili çok sayıda teorik ve deneysel çalışma olmasına rağmen, bazı kritik noktalar hala yeterince araştırılmamış ve ya ele alınmamıştır. Bu tez çalışmasından kullanılan karbon fiber takviyeli PET

malzemesi üzerindeyapılan araştırmaların çok az sayda olması, bu alanda daha fazla çalışmanın yapılmasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, 3D yazıcılarla üretilen kompozit yapıların delik delme operasyonları ile ilgili literatürde yeterli bilgi olmamakta ya da, mevcut çalışmalar genellikle klasik üretim yöntemleriyle elde edilen malzemelere odaklanmaktadır. Bu tez, PET CF-15 malzemesinde delik delme işlemlerinin optimizasyonuna yönelik kapsamlı bir çalışma yürüterek, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Çalışma, delik delme işlemleri sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon gibi sorunları inceleyecek ve bu sorunları minimize etmek için optimize edilmiş delik delme parametrelerini belirleyecektir. Bu amaçla, optimizasyon teknikleri kullanılacak ve farklı takım tipleri, kesme hızı, ilerleme hızı gibi parametrelerin etkileri deneysel olarak incelenecektir. Çalışma, saf PET ve PET CF-15 malzemelerinde delik delme işlemlerinin optimizasyonuna yönelik önemli katkılar sağlayacaktır.

2.4. Optimizasyon Yöntemleri

2.4.1. Delik Delme İşleminde Optimizasyon İhtiyacı

Delik delme işlemleri zamanı, delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi gibi parametrelerin kontrolü üretilen malzemenin kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Ancak yapılan uygulamalarda bu parametreler üzerinde etkisi olan pek çok değişken vardır: ilerleme ve kesme hızı,matkap ucu, kullanılan soğutma sıvıları gibi. Bu değişkenler arasında karmaşık ilişkiler olduğuna göre malzeme kalitesinin en optimum düzeyde olması için işlem parametrelerinin belirlenmesi basit bir süreç değildir. Bu noktada, farklı optimizasyon yöntemlerinden yardım faydalanılmıştır.. Uygulamacılar optimizasyon çalışmalarını, delik delme işlemlerinde kaliteyi ve üretim verimliliğini arttırmak, maliyetleri azaltmak amacıyla kullanmaktadırlar. Bu bölümde özellikle Taguchi Metodu, Varyans Analizi – ANOVA, Yanıt Yüzeyi yöntemi – RSM gibi yaygın kullanılan optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra modern teknikler de ele alınacaktır. Bu optimizasyon yöntemleri, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek kadar güvenli ve detaylı sonuçlar üretiyor ve biz araştırmacılara kalite, verimlilik ve maliyet açısından avantajlar sağlıyor [45]. Delik delme işlemlerinde optimize edilmesi gereken başlıca ürün performans ölçütleri delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasıdır. Kriterlerin optimumunun sağlanabilmesi için üretim parametrelerinin doğru seçilmesi, ürün üzerinde yapılan uygulamalar zamanı kullanılan ilerleme, kesme hızı gibi parametrelerin en uygununu seçmek gerekmektedir.

2.4.2. Deneysel Tasarım Yöntemleri

Deney Tasarım Yöntemleri (DOE), süreçteki değişkenliği azaltmak ve hem süreç verimliliğini hem de yeteneğini artırmak için 21-ci yüzyılda kullanılan en etkili kalite iyileştirme yöntemlerinden biridir [46]. Önceki geleneksel yöntemlerde, her bir faktör ayrı ayrı değiştirilerek elde edilen sonuçlar bağımsız olarak analiz edilmekteydi. Modern deney tasarımlarında birden fazla faktör aynı anda değiştirilerek analiz ediliyor. Delik delme işlemleri zamanı deneysel tasarım tekniklerini kullanmak araştırmacılara bu avantajları sağlar:

- Yapılan deneylerin sayısını azaltır.
- Daha güvenilir sonuçlar üretir.
- Faktörler arası etkileşimlerin etkisini analiz eder.

Literatürde olan araştırmalardan da görüldüğü üzere DOE yaklaşımı delik delme işlemlerinde çoğunlukla Taguchi Metodu, ANOVA, RSM ile birlikte kullanılmaktadır.

2.4.3. Taguchi Yöntemi

2.4.3.1. Temel Prensipler

Taguchi yöntemi Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bir istatistiksel tekniktir ve malzemelerin kalitesini artırmak için kullanılır [47]. Bu metodun uygulamacılar tarafından tercih edilmesinin ana amacı sistemin dış etkenlere karşı direncini artırmak ve varyansı en düşük seviyeye indirmektir. Taguchi planları, değişik koşullar altında kararlı ve en iyi performansı göstermek için güç ve etkili bir yöntem sunarlar. Güncel çalışmalarda Taguchi yönteminin, deney sayısını azaltırken işlem parametrelerinin etkilerini güvenilir şekilde değerlendirmeye imkân sağladığı belirtilmektedir. Sabry ve arkadaşları, L_9 ortogonal dizi kullanarak dönme hızı, ilerleme hızı, eksenel kuvvet ve takım profili gibi parametreleri optimize etmiş ve yöntemin işlem performansını iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir [48]. En uygun tasarımın belirlenebilmesini sağlamak için süreç seçilen stratejik tasarım parametre düzeylerine maruz kalacak şekilde planlanan deneyleri gerçekleştirmelidir [47]. Taguchi metodolojisinin amacı sadece ortalama çıktıya istenen değere yaklaşmak değil; bununla birlikte çıktının varyansını da minimize etmektir ki bu özellikle delme işlemleri açısından araştırmacılara önemli avantajlar sağlar.

2.4.3.2. Ortogonal Diziler

Taguchi yötemi, delik delinmesi zamanı değişkenlerin etkilerini analiz etmek için ortogonal diziler kullanır. Önemli avantajı kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisini en aza indirerek, test sayısını minimize etmesidir. Bundan başka işlem zamanı optimum delik delme parametrelerini belirlemek amacıyla sistematik bir yöntem sunuyor [49]. Ayrıca, tüm faktörlerin etkileri bağımsız olarak gözlemlenebilir. Örneğin, üç faktörlü bir çalışmada (her faktör 3 seviyeli) geleneksel tam faktöriyel tasarım 27 deney gerektirirken, Taguchi L_9 dizisi ile sadece 9 deney yaparak benzer analizler gerçekleştirilebilir.

2.4.3.3. Sinyal-Gürültü Oranı

Sinyal-Gürültü oranını kullanarak kalite köntrolü yapmak Taguchi yönteminin en önemli noktasıdır [50]. Amacı çıktı değişkenliklerini en aza indirmek olan S/N oranının 3 türü vardır:

- Daha küçük daha iyidir [51]: Delik çapı hatasının minimize edilmesi için kullanılır.
- Daha büyük daha iyidir [51]: Malzeme kaldırma oranı gibi maksimize edilmesi istenen çıktılarda kullanılır.
- Nominal en iyidir: Delik çapı nominal olması istenen uygulamalarda kullanışlıdır.

Örneğin, bir karbon fiber takviyeli plakanın delinmesinde, kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap tipi gibi faktörler seçilip L_9 dizisi oluşturularak deneyler yapılabilir. Her deney sonrası ölçülen delik çapı hatası ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinden S/N oranları hesaplanarak optimum işlem parametreleri belirlenir.

2.4.4. Varyans Analizi – ANOVA

ANOVA, ikiden fazla grubun ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemeye yarayan istatistiksel bir yöntemdir [52]. Bu analiz türü, işlem zamanı hangi faktörlerin daha çok etki yarattığını belirlemekte yardımcı oluyor. Araştırmamızın konusu üzere delik delme işleminin optimizasyonunda ANOVA aşağıdaki amaçlara hizmet etmektedir:

- Hangi faktörün yüzey kalitesinde daha çok etki yaptığını bulmak

- Faktörler arasında etkileşimlerin olup olmadığı, ve ya varsa ne ölçütte önemli olduğu

- Optimum parametre kombinasyonlarının doğruluğu gibi bilgiler elde edilebilir.

2.4.5. Yanıt Yüzeyi Yöntemi - RSM

Süreçleri optimize etmek, iyileştirmek ve geliştirmek için kullanılan yanıt yüzeyi metodolojisi olarak isimlendirilir [53]. Bu tekniğin en önemli avantajı birden fazla faktörün ve bunlar arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi için gereken deney sayısını aza indirmektir [54]. Delik delme işlemlerinde, örneğin yüzey pürüzlülüğünü ve delik çapı sapmasını minimize etmek için kesme hızı ve ilerleme hızı gibi parametreler arasındaki ilişki RSM yardımıyla modellenebilir. RSM genellikle ikinci dereceden polinom modeller kullanmaktadır. Çalışmalarda sıklıkla araştırmacılar tarafından tercih ediliyor. Örneğin, Vijayan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada hibrit karbon fiber kompozitlerin delinmesinde itme kuvveti ve çapak yüksekliğini tahmin etmek için RSM modeller geliştirilmiş ve optimizasyon yapılmıştır. Sonuçlar, özellikle ilerleme hızının itme kuvveti ve çapak yüksekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. ANOVA analizleri, deneysel verilerin %95 güven aralığında modele uyduğunu ortaya koyarak RSM tabanlı yaklaşımın güvenilir model olduğunu doğrulamıştır [55].

Tablo 2. 2 Vijayan ve arkadaşlarının bulduğu arzu edilebilirlik değerleri

Numara	Delme Hızı (N)	İlerleme Hızı (f)	CNT oranı (%)	Delme açısı (Θ)	İtme Kuvveti (T)	Çapak yüksekliği (h)	İstenebilirlik
1	511.56	4.11	4.74	113.48	7.55313	0.00867	1 (Seçilen)
2	538.44	4.57	4.99	111.1	7.0906	0.0308	1
3	551.72	8	4.55	112.58	11.7932	0.01169	1
4	502.25	4	4.98	116.68	7.85585	0.01972	1

Delik delme işlemlerinde verim artırma çalışmaları araştırmacılar için çok önemlidir.

Çünkü bu yapılan çalışmalar sonu artırılan üretim kalitesi maliyetleri azaltır, süreçlerin güvenilirliğini sağlar. Bu zaman araştırmacılara Taguchi Metodu ve ANOVA gibi geleneksel yöntemler etkili araçlar sunar. Bu gibi metotlar araştırmalar zamanı deney sayısını minimumda tutarak maliyet ve süreç zamanını en aza indirir. RSM kullanılarak daha karmaşık optimizasyon problemleri çözmek mümkün olurken, çoklu yanıtlı optimizasyon gerçek üretim ortamlarında karşılaşılan çok amaçlı problemlerin çözümünde önemli faydalar sağlar. Bu yöntemlerin araştırmacılara sunduğu en önemli özellikleri de daha hızlı ve hassas çözüm sağlayabilmesidir. En son kalitenin arttırılması için doğru seçilmiş optimizasyon teknikleri aynı zamanda üretim maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Gelecekte yapay zeka ve makine öğrenmesine dayalı yöntemlerin daha fazla entegre edilmesinin ardından optimizasyon süreçlerinin daha da ileriye taşınacağı tahmin edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzeme

Yaptığımız çalışmada delik delme deneylerinin gerçekleştirilmesi için saf PET ve BASF Ultrafuse PET CF15 kompozit filament malzemesinin kullanımı tercih edilmiştir. PET CF15 malzemesi %15 oranında karbon fiber takviyesi içeren, polietilen tereftalat (PET) bazlı bir kompozit malzemedir. PET CF15 malzemesinde karbon fiber kullanımı malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiş ve düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı sağlamıştır. Tüm bu özellikleri göz önünde bulundurularak PET CF15, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi alanlarda genellikle tercih edilmektedir.

Saf PET ve PET CF15 malzemesinin temel özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1'de verilmiştir:

Tablo 3. 1 Saf PET ve PET-CF15 malzemelerinin temel özellikleri

Özellik	Saf PET	PET CF15 (Karbon Fiber Takviyeli PET)
Nozul sıcaklığı	240–260 °C	250–280 °C
Tabla sıcaklığı	70–90 °C	80–100 °C
Baskı hızı	40–80 mm/s	30–60 mm/s
Yoğunluk	≈ 1.27 g/cm³	≈ 1.35–1.40 g/cm³
Nem alma özelliği	Orta düzey higroskopik	Yüksek higroskopik
Yüzey kalitesi	Parlak ve düzgün	Mat ve lif dokulu
Kimyasal direnç	İyi kimyasal direnç	Çok iyi kimyasal direnç

PET CF15 gibi malzemelerde kullanılan karbon fiber katkısı, katmanlı üretim teknolojisi olduğu için katmanlar arası yapışma mukavemetini artırarak oluşabilecek zayıf noktalardan kaynaklı problemleri minimize etmektedir. Bir başka kullanım için sunduğu önemli avantaj ise düşük nem alma kapasitesidir. Özellikle değişken çevresel koşullarda, açık havada kullanışlı olduğu için araştırmacılar tarafından tercih ediliyor. Çalışmamızda kullanmış olduğumuz saf PET ve PET CF-15, bizim gibi araştırmacılar için yüksek darbe dayanımı ve yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretiminde ideal seçenek sunmakta olup delik delme işlemi sırasında oluşan mekanik yüklere karşı üstün performans sergilemektedir. Malzemede olan bu fiziksel ve mekanik özellikler, yapılan deneysel çalışmaların doğrululuğunu artırmakta önemli bir rol oynamaktadır.

3.2. 3D Baskı Süreci

Çalışmamızda üretilen kompozit malzeme numuneleri FDM yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Endüstride yaygın olarak kullanılan bu katmanlı üretim teknolojisi, bir filamentin belirli sıcaklığa kadar eritilerek katman katman nesne üzerine biriktirilerek yapılır. Kullandığımız PET CF-15 filamenti %15 karbon fiber içeriğine sahiptir. Bu içeriği sayesinde FDM yöntemiyle dayanıklılık ve yüksek mukavemet özelliklerini koruyarak kaliteli numune üretimine olanak sağlamıştır. Malzeme özelliklerini korumak ve işlem kalitesini artırmak amacıyla baskı parametreleri optimize edilerek kullanıldı.

3.2.1. Baskı Parametreleri

3D baskı işlemi zamanı aşağıdaki parametreler kullanılmıştır:

- Katman kalınlığı: 0,15-mm, 0,3-mm olmak üzere 2 farklı kalınlıkta belirlenmiştir.
- Baskı sıcaklığı (Nozul): Technical Data Sheet-e göre 250°C - 270°C aralığında tutulmuştur. PET CF-15 malzemesinin en doğru şekilde akışı için bu sıcaklık optimal kabul edilmiştir.
- Nozul çapı: 0.6 mm olarak belirlenmiştir. Karbon fiberlerinin partikülleri aşındırıcı etkiye sahip olduğu için standart nozullar yerine sertleştirilmiş alternatifler tercih edilmiştir.
- Baskı hızı: 50 mm/s – 100 mm/s arasında değişmiştir. Düşük hızlarda daha pürüzsüz yüzeyler elde edilirken, üretim süresi de gereken seviyede tutulmaya çalışılmıştır.

Üretim sürecinde 4 farklı faktör ve 2 seviyeli (2-level factorial) bir deney tasarımı uygulanmış, bu faktörler materyal, baskı hızı, katman kalınlığı, baskı yönü olarak Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2 Faktör ve Seviyeler

Faktör	Parametreler	Seviye 1	Seviye 2
A	Materyaller	PET	PETCF15
B	Baskı hızı	50	100
C	Katman Kalınlığı	0.15	0.3
D	Baskı Yönü	XY	ZX

Yapılan araştırmalar Taguchi L_8 ortogonal dizi yöntemi kullanılarak planlandı ve analiz edildi. Bu yöntem, deney sayısını en aza indirirken aynı zamanda maksimum miktarda bilgi elde etmek ve böylece deneysel maliyetleri ve zamanı düşürmek için kullanılmıştır. L_8 ortogonal dizi, her biri 2 seviyede 4 faktöre sahip toplam 8 deney kombinasyonu sağladı ve bu, parametre optimizasyonu için deneyleri yapılandırmada etkilidir. Deneyler Tablo 3.3'deki gibidir.

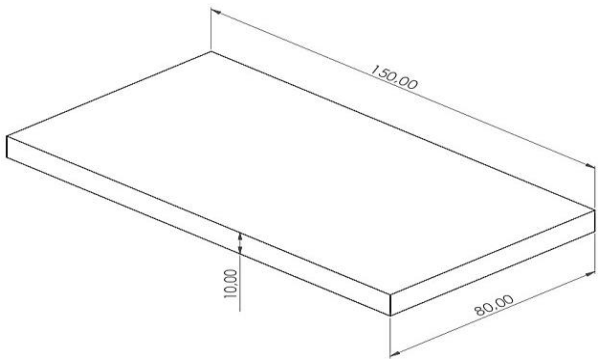
Tablo 3. 3 Deney tablosu

Deney No	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	2	2	2

Deney No	A	B	C	D
5	2	1	2	1
6	2	1	2	2
7	2	2	1	1
8	2	2	1	2
No	A	B	C	D
1	PET	50	0,15	XY
2	PET	50	0,15	ZX
3	PET	100	0,3	XY
4	PET	100	0,3	ZX
5	PETCF15	50	0,3	XY
6	PETCF15	50	0,3	ZX
7	PETCF15	100	0,15	XY
8	PETCF15	100	0,15	ZX

3.2.2. Numune üretimi

Tez araştırması için üretilen numuneler, literatürdeki standartlar ele alınarak uygun şekilde ve belirlenen ölçüde hazırlanmıştır. Numunelerin ölçüleri ve geometrileri, Şekil 3.1'de sunulmuş ve 2 baskı yönünde üretim yapılmıştır. Numuneler, eriyik biriktirme prensibiyle çalışan Creality K2T 3D yazıcısı kullanılarak 0,6 mm nozül çapında üretilmiştir. Delik delme işlemi uygun olarak 150mm x 80mm x 10mm ölçülerine sahip malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 1 Deney numunesinin teknik çizimi ve ölçüleri

Baskı yönleri:

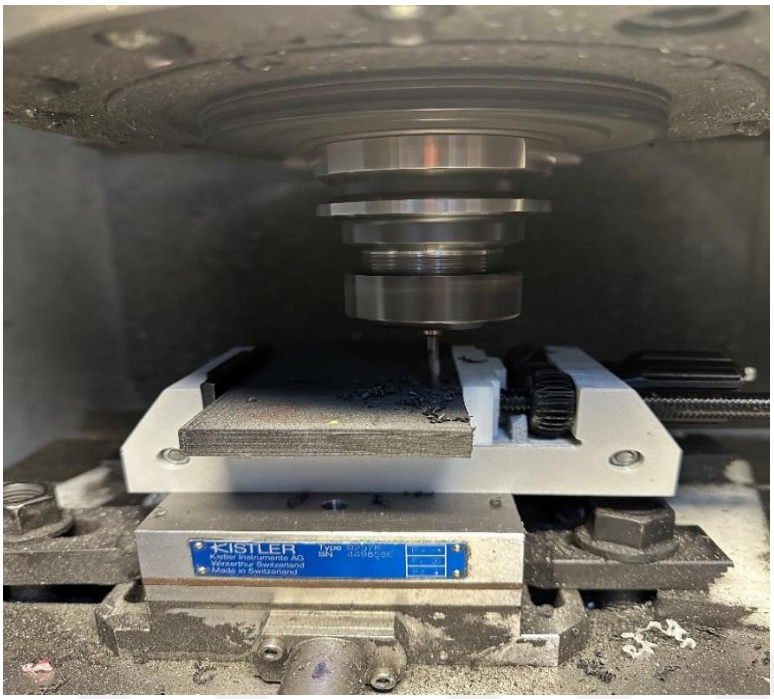
- **Yön 1**: Katmanlar XY düzleminde yatay hizalanmıştır.
- **Yön 2**: Katmanlar ZX düzlemine göre hizalanmıştır.

Literatürde yapılan araştırmalara göre bu yön farklılıkları, delik delme işlemi sırasında malzeme katmanlarının delaminasyon davranışlarının ve mekanik direncinin incelenmesi bakımından önemli faktör olarak ortaya koyulmuştur.

Toplamda 8 adet numune ve her parametre için 2 tekrar olacak şekilde deney setleri oluşturulmuş, numuneler üretildikten sonra yüzey işlemleri yapılmadan destek yapıları temizlenmiş ve doğrudan delik delme deneylerine hazırlanmıştır.

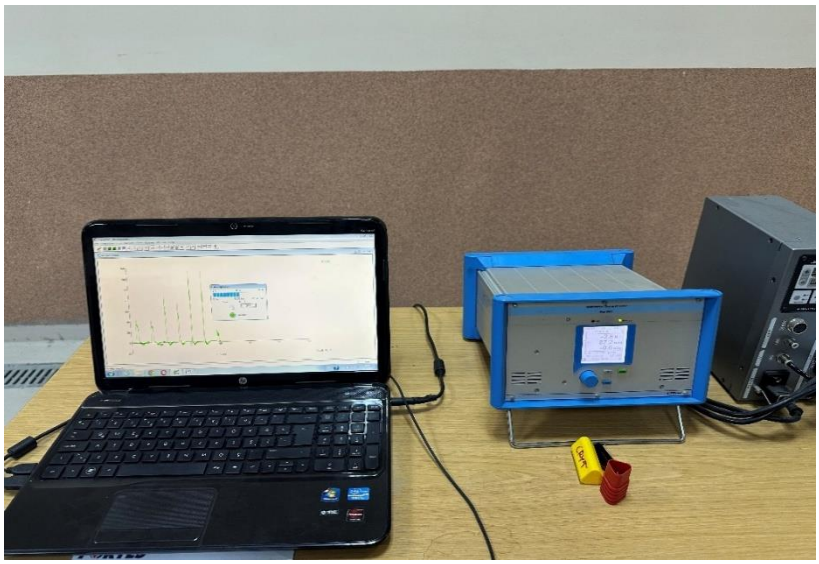
3.3. Delik Delme Deneyleri

Çalışmamızın amacı üzere yapılan delik delme işlemleri, FDM teknolojisiyle elde edilen karbon fiber takviyeli PET kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapmış olduğumuz deneyler, delik kalitesi ve işlenebilirlik açısından önem arz etmektedir. Araştırmada delil delme işlemleri zamanı malzemenin anizatropik yapısının ve FDM üretim kaynaklı yapısal düzensizliklerin etkisi dikkate alınmıştır. Delme işlemi CNC freze tezgahında soğutma işlemi kullanılmadan yapılmıştır Şekil 3.2.



Şekil 3. 2 Delme işlemi sırasında numunenin bağlama aparatı üzerine sabitlenmiş görünümü

Kesme kuvveti CNC tezgahına sabitlenmiş bir dinamometre (Kistler 9257B), amplifikatör (Kistler 5070A), veri toplama sistemi (Kistler 5697A DAQ) ve DynoWare yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir Şekil 3.3.

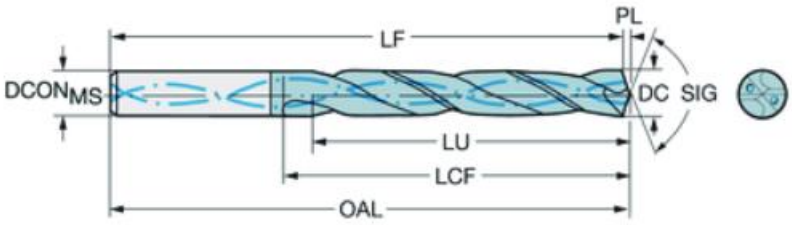


Şekil 3. 3 Kistler veri toplama ve kayıt sistemi

3.3.1. Matkap Ucu Seçimi

Geleneksel metallerle kıyasla kompozit malzemelerde delik delme işlemi daha zorlu bir süreçtir. Özellikle delaminasyon, yüzey pürüzlülüğünde artım ve fiber çekilmesi gibi

sorunlar kullanılan matkap türünden doğrudan bağlıdır. Çalışmamızda karbon fiber takviyeli PET kompozit malzemelerinde literatürde de yaygın olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar vermiş 4 mm çapında Sandvik Coromant CoroDrill 460-XM karbürtwist drill matkap türü kullanılmıştır.



Şekil 3. 4 Sandvik Coromant CoroDrill 460-XM

Twist drill ucu seçilmesinin başlıca nedenleri şunlardır:

- Düşük ilerleme hızlarında kontrollü delme sağlıyor.
- Standart geometriye sahiptir.
- Delik merkezleme açısından avantajlıdır.

Bundan başka, karbon fiberlerinin yüksek aşındırıcı özellikleri olduğu için sert karbür kaplı matkap uçları tercih edilmiştir. Bununla takım ömrü daha uzun tutularak delik delinmesi sürecinde aşırı aşınma engellenmiştir. Matkap uçları, her deney seti yapıldıktan sonra temizlenmiş, aşınma belirtileri olduğu zaman ise yenisi ile değiştirilmiştir. Bununla deneysel verilerimizin güvenilirliği sağlanmıştır.

3.3.2. Kesme Parametreleri (İlerleme, Devir vb.)

Yaptığımız araştırmada deney zamanı kesme parametreleri olarak ilerleme (mm/dak) ve devir hızı (rpm) faktörleri dikkate alınmıştır. Belirlenen delme parametreleri:

- **İlerleme Hızı (mm/dak)**:
    - F_1: 400 mm/dak
    - F_2: 800 mm/dak
    - F_3: 1200 mm/dak

- **Devir Hızı (rpm)**:
    - S_1: 1500 rpm
    - S_2: 4500 rpm

Belirlediğimiz faktörler, literatürde kompozit malzemelerle yapılmış deneyler sonrası önerilen optimal delik delme parametre aralıklarına göre seçilmiştir. Yüksek devir ve düşük ilerleme hızının özellikle delaminasyonu minimize etmekde etkili olduğu bilinmektedir.

3.4. Çekme Testi

Üretmiş olduğumuz numunelerin mekanik dayanım özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, ASTM D7774 standardına uygun olarak Shimadzu marka çekme test cihazında yapılmıştır. Test öncesinde numuneler Şekil 3.4'te gösterildiği gibi cihazın alt ve üst çeneleri arasına düzgün bir şekilde yerleştirilmiş ve kaymayı önlemek amacıyla sıkıca sabitlenmiştir.



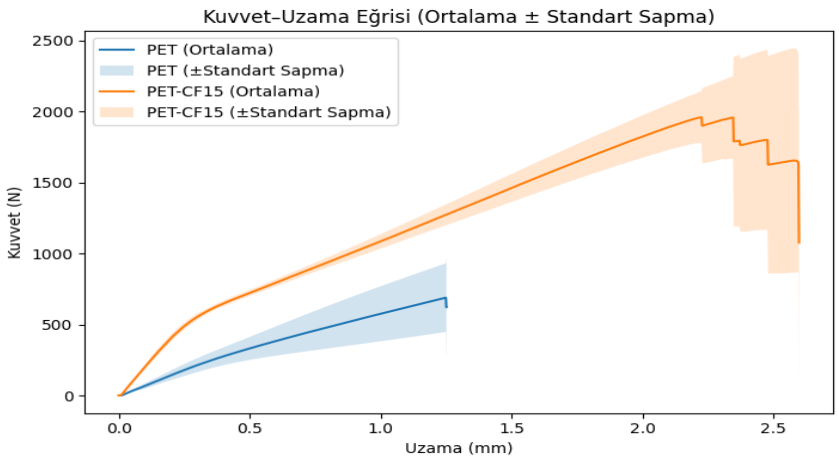
Şekil 3. 5 Çekme test cihazına yerleştirilmiş numunenin deney öncesi görünümü

Test zamanı numuneye eksenel yönde çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu yükleme numune kopuncaya kadar devam ettirilmiştir. Test devam ettirildiği süreçte kuvvet ve uzama değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla numunelerin çekme dayanımı ve kopma davranışı değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

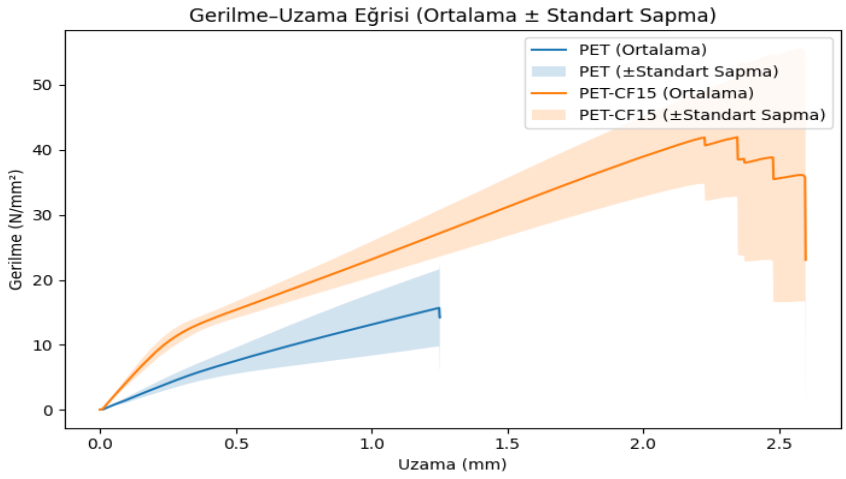
Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat teknolojileri kapsamında FDM yöntemi ile üretilen karbon fiber takviyeli PET ve PET-CF15 kompozit malzemelerin delik delme davranışları incelenmiş ve işleme parametrelerinin malzeme performansı üzerindeki etkileri deneysel verilerle ortaya konulmuştur. Çalışma, hem literatürde mevcut olan teorik yaklaşımları desteklemiş hem de özellikle 3D yazıcı ile üretilmiş kompozit malzemeler üzerinde sınırlı sayıda bulunan deneysel çalışmalara önemli katkılar sağlamıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, karbon fiber takviyesinin polimer matrisli malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde belirgin ve olumlu bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmüştür. PET-CF15 kompozit malzemesi, saf PET malzemeye kıyasla daha yüksek elastisite modülü, daha fazla yük taşıma kapasitesi ve artan rijitlik değerleri sergilemiştir. Bu durum, karbon fiberlerin yük transfer mekanizmasında etkin rol oynaması ve kompozit yapı içerisinde mekanik dayanımı artırması ile açıklanabilir. Bununla birlikte, kompozit malzemelerin anizotropik ve heterojen yapısı nedeniyle delik delme işlemi sırasında çeşitli yüzey ve yapı kusurlarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Tez kapsamında literatürde de belirtildiği üzere bu tür hasarlar, kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünü zayıflatmakta ve kullanım performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

FDM yöntemiyle üretilen saf PET ile %15 karbon fiber takviyeli PET (PET-CF15) kompozit malzemelerinde delik delme davranışı deneysel olarak analiz edilmiştir. Çekme testi bulguları, delme işlemi sırasında elde edilen eksenel kesme kuvvetleri (F_t) ile delik yüzey pürüzlülüğü değerleri ayrı başlıklar altında sunulmuş ve devir sayısı, ilerleme hızı ile baskı yöneliminin (XY ve ZX) bu sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan saf PET ve PET-CF15 kompozit malzemelerin mekanik davranışları, takviye oranına ve malzeme yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu farklılıkları incelemek amacıyla numuneler üzerinde çekme testleri uygulanmış ve elde edilen veriler, temel mekanik özelliklerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlar, sonraki bölümlerde incelenen delme işlemi ve yüzey pürüzlülüğü analizleri için referans niteliği taşımaktadır. PET ve PET-CF15 numunelerine ait kuvvet–uzama eğrileri Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4. 1 PET ve PET-CF15 numunelerine ait kuvvet–uzama eğrilerinin malzeme bazlı ortalama değerleri ve ± standart sapma bantları

Elde edilen sonuçlara göre PET-CF15 malzemesi, saf PET'e göre genel olarak daha yüksek kuvvet değerleri göstermektedir. Bu durum, fiber takviyesinin yük taşıma kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Saf PET numuneleri ise daha düşük maksimum kuvvet değerlerine sahip olmakla birlikte daha sünek davranış sergileyerek daha yüksek uzama değerlerine ulaşmıştır. Şekil 4.2'ye göre gerilme–uzama eğrileri, PET-CF15 malzemesinin daha yüksek elastik modül ve maksimum gerilme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, saf PET numuneleri daha düşük gerilme seviyelerinde kalmaktadır.

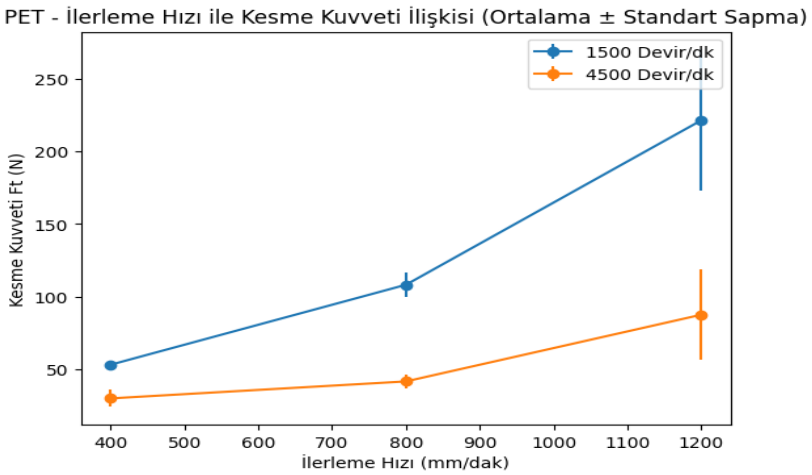


Şekil 4. 2 PET ve PET-CF15 numunelerine ait gerilme–uzama eğrilerinin malzeme bazlı ortalama değerleri ve ± standart sapma bantları

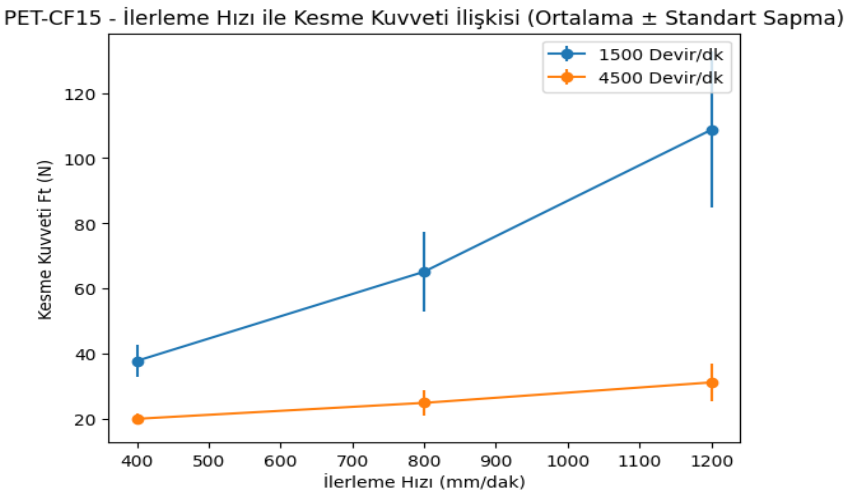
Bu bulgular, fiber takviyesinin malzemenin dayanımı ve rijitliği üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Sunulan kuvvet – uzama ve gerilme – uzama

eğrileri, her malzeme grubu için birden fazla numuneden elde edilen ortalama mekanik davranışı temsil etmektedir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş saf PET ve PET-CF15 kompozitlerinde delik delme işlemi sırasında oluşan eksenel kesme kuvvetleri (F_t), işleme parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir. Takım devir sayısı ve ilerleme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri grafikler ve deneysel veriler yardımıyla analiz edilmiştir. Ayrıca baskı yöneliminin (XY ve ZX) delme sürecine önemli düzeyde etki ettiği belirlenmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'te ortalama kesme kuvveti değerleri, standart sapma hata çubukları ile birlikte sunulmuştur.



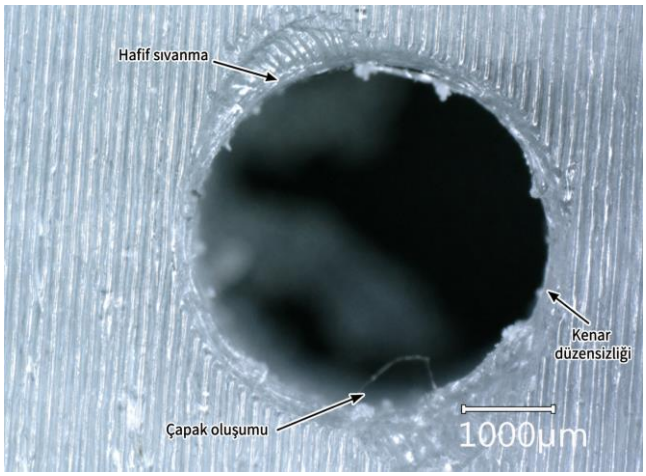
Şekil 4. 3 PET malzemesi



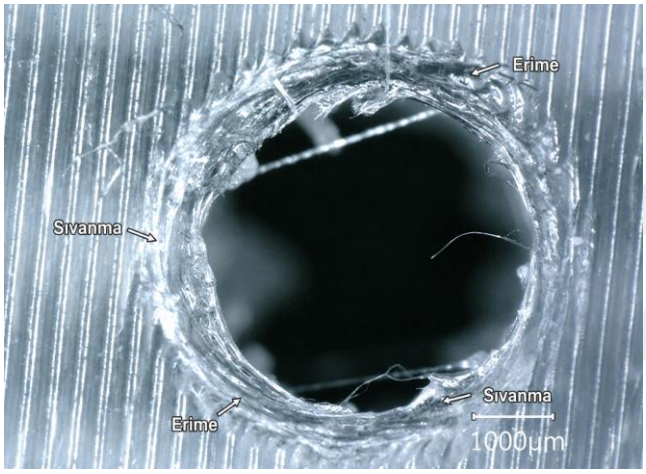
Şekil 4. 4 PET-CF15 malzemesi

Sonuçlar, saf PET malzemesinde özellikle yüksek ilerleme hızlarında veri dağılımının arttığını, PET-CF15 malzemesinde ise kesme kuvvetlerinin daha kararlı olduğunu

göstermektedir. Grafikler incelendiğinde, her iki devir sayısında da ilerleme hızının artışıyla birlikte kesme kuvvetlerinin yükseldiği açık biçimde görülmektedir. Özellikle 1500 rpm devir sayısında, ilerleme hızının 400 mm/dak'tan 1200 mm/dak'a çıkarılması kesme kuvvetinde belirgin bir artış oluşturmuştur. Bu durum, ilerleme hızının artmasıyla matkap ile malzeme arasındaki temas alanının genişlemesi ve talaş oluşumu sırasında oluşan direnç kuvvetlerinin yükselmesiyle açıklanmaktadır. Yüksek devir sayısında (4500 rpm) elde edilen kesme kuvvetlerinin, düşük devir sayısına (1500 rpm) göre daha düşük seviyelerde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, yüksek kesme hızlarının talaş oluşumunu kolaylaştırması ve malzemenin daha dengeli kesilmesi ile açıklanabilir. Delik delme deneyleri her parametre kombinasyonu için tekrar edilerek gerçekleştirilmiş ve ölçülen kesme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olması, deneylerin güvenilir ve tekrar edilebilir olduğunu göstermiştir.PET ve PET-CF15 malzemeleri karşılaştırıldığında, karbon fiber takviyesinin kesme mekanizması üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Fiber takviyeli yapının daha kırılgan özellik göstermesi nedeniyle bazı parametrelerde kesme kuvvetlerinin daha düşük seviyelerde oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, fiber takviyesi delme bölgesinde lokal mekanik direnç artışı ve lif hasarı oluşumuna yol açabilmektedir. Delik delme parametrelerinin doğru seçilmesi, sadece kesme kuvvetlerinin azaltılmasını değil, aynı zamanda yüzey kalitesinin iyileştirilmesini de sağlamaktadır. Ayrıca, kesme kuvvetlerinde gözlenen değişimlerin yüzey pürüzlülüğü sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiş ve bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Baskı yöneliminin de kesme kuvvetleri üzerinde etkili olduğu saptanmış; ZX yöneliminde katmanlar arası bağın daha zayıf olması nedeniyle kesme sırasında düzensiz yük aktarımı ve daha yüksek kuvvet dalgalanmaları oluşumu gözlemlenmiştir. Delik delme işlemleri farklı devir sayısı ve ilerleme hızı parametreleri altında gerçekleştirilmiş, ardından numuneler optik mikroskop altında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu incelemenin temel amacı, işleme parametrelerinin delik kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Elde edilen bulgular, her iki malzeme grubunda da işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Saf PET numunelerinde yüzey pürüzlülüğünün, malzemenin termal kararlılığı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. 2 numaralı saf PETnumunesi, 1500 rpm ve 800 mm/dak parametrelerinde R_a = 0,332 µm değeri ile en kararlı yüzey kalitesini sunmuştur. Buna karşılık, numune 4'te ilerleme hızının 400 mm/dak'a düşürülmesi sonucu sıcaklık artışı olmuş , bu durum yüzeyde erime ve sıvanma oluşumuna neden olmuştur. Sonuç olarak R_a değeri 3,764 µm seviyesine yükselmiştir.

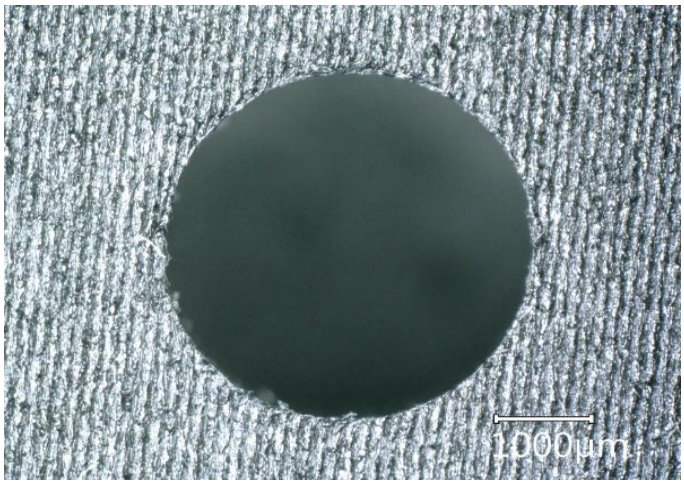


Şekil 4. 5 Numune 2'ye ait delik çıkış bölgesi görüntüsü

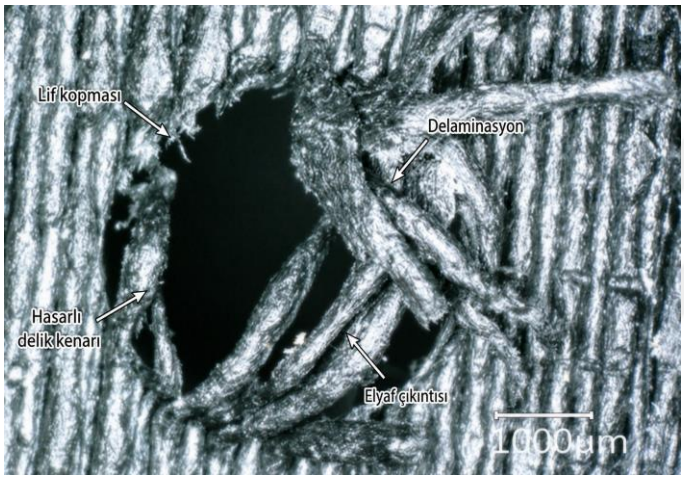


Şekil 4. 6 Numune 4'e ait delik çıkış bölgesi görüntüsü

Karbon fiber takviyesi, PET-CF15 numunelerinde matrisin rijitliğini artırarak mikroskobik ölçekte yüzey pürüzlülüğünü azaltmış, ancak lif hasarını önemli ölçüde artırmıştır (Numune 5-8). Şekil 4.7'de yer alan numune 6, R_a = 0,188 µm değeri ile tüm deneyler arasında en düşük yüzey pürüzlülüğünü göstermiştir. Ancak numune 8'de düşük ilerleme hızında yoğun lif kopması ve delaminasyon oluşumu gözlemlenmiş; bu durum, işleme kalitesinde belirgin bir düşüşe neden olmuştur Şekil 4.8.

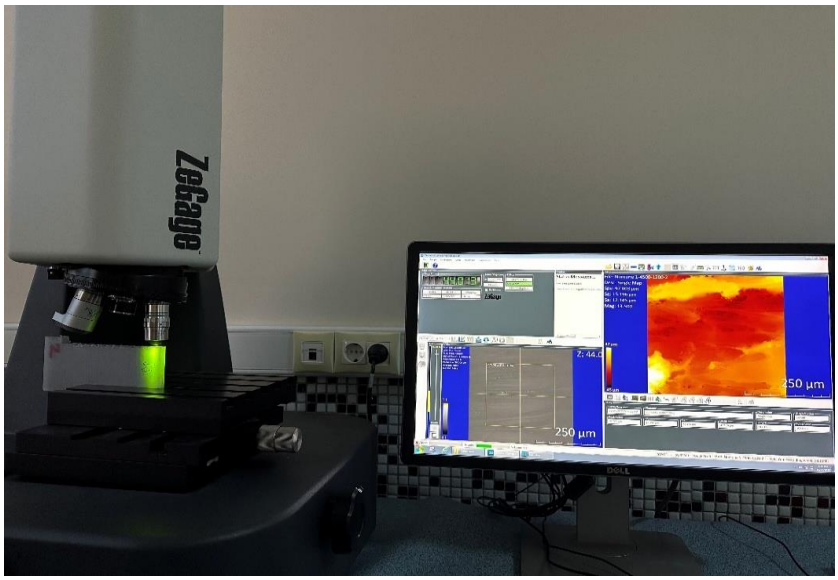


Şekil 4. 7 Numune 6'ya ait delik çıkış bölgesi görüntüsü



Şekil 4. 8 Numune 8'e ait delik çıkış bölgesi görüntüsü

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, PET malzemede düşük ilerleme hızının erimeye yol açtığı, PET-CF15 malzemede ise lif hasarını artırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. %15 karbon fiber katkısı yüzey pürüzlülüğünü azaltmada etkili olmakla birlikte, uygun olmayan parametre seçiminde delaminasyon riskini artırmaktadır. Saf PET için 800 mm/dak, PET-CF15 için ise 1200 mm/dak ilerleme hızının en iyi yüzey kalitesi ve delik geometrisini sağladığı görülmüştür. PET ve PET-CF15 numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Zygo optik profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9.



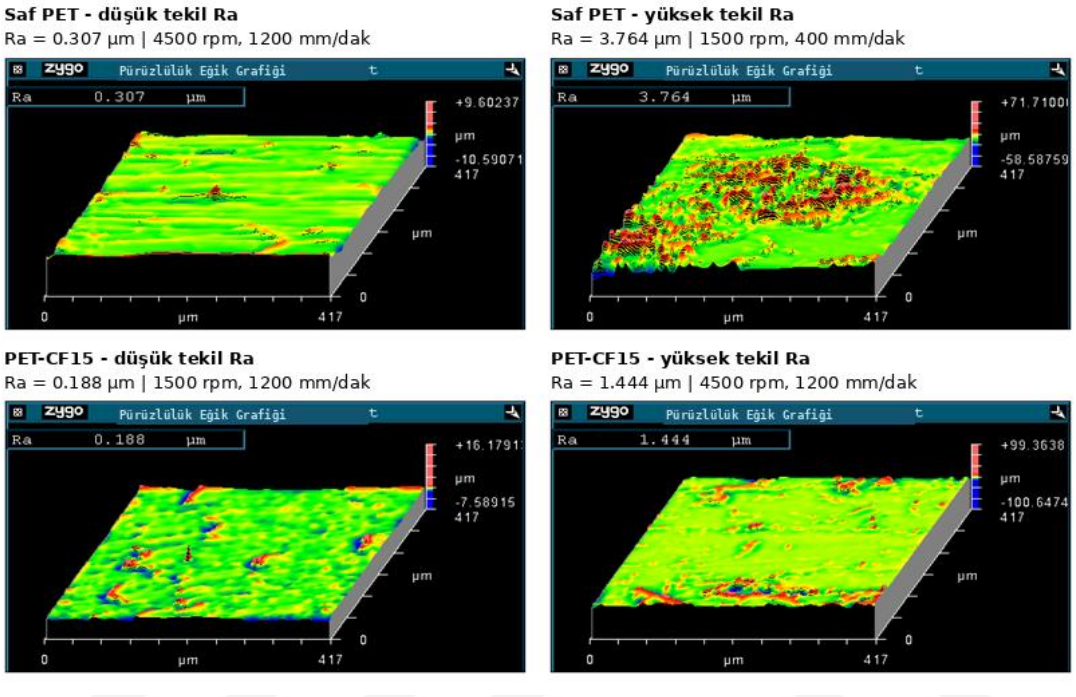
Şekil 4. 9 Zygo optik profilometre ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Elde edilen sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün hem işleme parametrelerinden hem de malzeme yapısından etkilendiğini göstermektedir. Şekil 4.11 ve 4.12 her bir parametre için birden fazla delikten elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini temsil etmektedir.Ortalama yüzey pürüzlülüğü eğilimlerine ek olarak, delik delme sonrası lokal yüzey durumunu göstermek amacıyla bazı tekil Zygo ölçüm örnekleri de değerlendirilmiştir. Bu değerler tek bir ölçüm sonucunu temsil etmekte olup, Taguchi optimizasyonunda verilen optimum parametre kombinasyonlarıyla doğrudan aynı anlamda değerlendirilmemelidir.

Tablo 4. 1 Zygo ölçümlerinden elde edilen seçilmiş tekil yüzey pürüzlülüğü (R_a) örnekleri

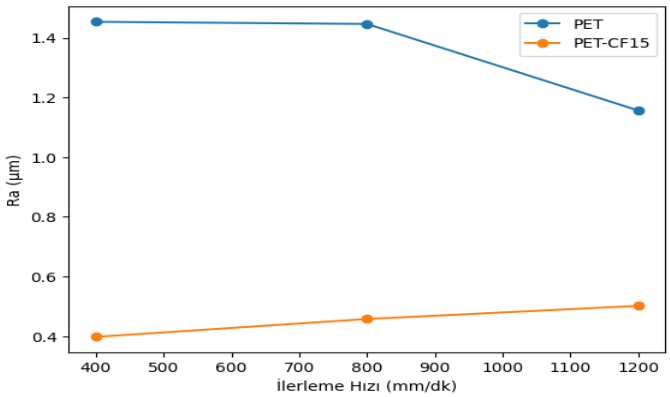
Malzeme	Örnek tipi	R_a değeri	Delme parametreleri
Saf PET	Düşük tekil R_a örneği	0,307 µm	4500 rpm, 1200 mm/dak
Saf PET	Yüksek tekil R_a örneği	3,764 µm	1500 rpm, 400 mm/dak
PET-CF15	Düşük tekil R_a örneği	0,188 µm	1500 rpm, 1200 mm/dak

Malzeme	Örnek tipi	R_a değeri	Delme parametreleri
PET-CF15	Yüksek tekil R_a örneği	1,444 µm	4500 rpm, 1200 mm/dak

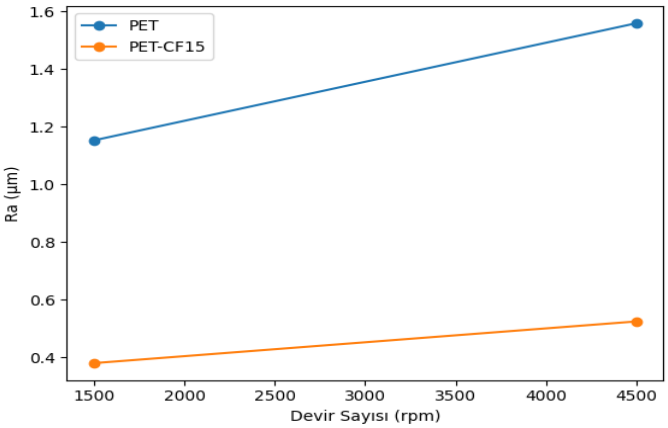


Şekil 4. 10 Seçilmiş tekil Zygo yüzey pürüzlülüğü ölçüm örnekleri

Bu nedenle, seçilmiş tekil R_a değerleri ile Taguchi sonucunda elde edilen optimum koşullar arasında farklılık görülmesi çelişki oluşturmamaktadır. Tekil R_a değerleri belirli bir ölçüm noktasının sonucunu, Taguchi analizi ise genel eğilim ve S/N oranlarına dayalı optimum koşulu göstermektedir.



Şekil 4. 11 PET ve PET-CF15 malzemelerinde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi



Şekil 4. 12 PET ve PET-CF15 malzemelerinde devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi

İlerleme hızı – yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu açık şekilde görülmektedir. PET kompozit malzemeden üretilmiş numunelerde R_a değerleri düşük ve orta ilerleme hızlarında birbirine yakın değerler göstermiş, ancak 1200 mm/dak ilerleme hızında ortalama R_a değerinde azalma gözlemlenmiştir. Buna karşılık, PET-CF15 numunelerinde ilerleme hızının artmasıyla birlikte R_a değerlerinin kademeli olarak yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durum, karbon fiber takviyesinin yüksek ilerleme hızlarında yüzey düzensizliklerini artırdığını göstermektedir. Devir sayısı–yüzey pürüzlülüğü grafiği değerlendirildiğinde, her iki malzeme grubunda da devir sayısının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış eğilimi olduğu belirlenmiştir. Saf PET numunelerinde, devir sayısının 1500 rpm'den 4500 rpm'e yükseltilmesi R_a değerlerinde önemli bir artışa neden olmuştur. Bu artış, yüksek devirlerde kesim bölgesinde oluşan sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak matrisin yumuşaması ile açıklanmaktadır. PET-CF15 numunelerinde ise devir sayısındaki artış R_a değerlerini artırmakla birlikte, bu artışın saf PET'e kıyasla daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Genel olarak, tüm devir aralığında PET-CF15 numuneleri saf PET numunelerine göre daha düşük R_a değerleri sunmuştur.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerlerinin daha açık şekilde değerlendirilmesi amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Bu analiz sayesinde delik delme parametrelerinin ve malzeme türünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiş ve Tablo 4.2'de sunulmuştur.

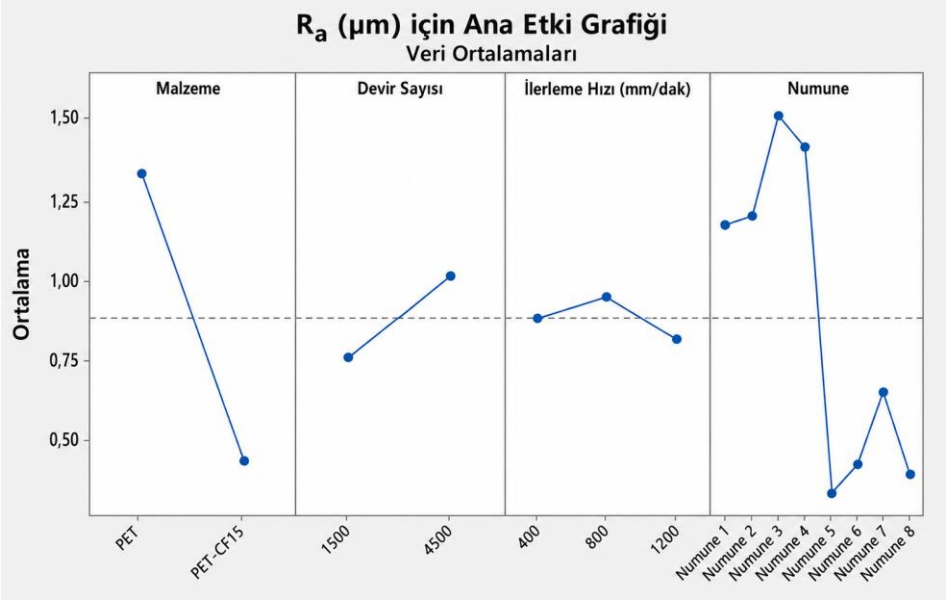
Tablo 4. 2 Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ANOVA sonuçları

Kaynak	SD	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F değeri	P değeri
Materyal	1	18,8697	18,8697	68,38	0,000
RPM	1	1,8078	1,8078	6,55	0,012
İlerleme hızı	2	0,3028	0,1514	0,55	0,580
Materyal*RPM	1	0,4155	0,4155	1,51	0,223
Materyal*Feed	2	0,7928	0,3964	1,44	0,244
RPM*İlerleme hızı	2	1,9701	0,9850	3,57	0,033
Hata	84	23,1815	0,2760		
Toplam	93	47,1910			

Verilen ANOVA sonuçlarına göre, malzeme türünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak oldukça önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir ($p < 0,001$). Aynı şekilde, takım devir sayısının da yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmaktadır ($p = 0,012$). Ancak ilerleme hızının tek başına etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür ($p = 0,580$). Buna rağmen, devir sayısı ile ilerleme hızı arasındaki etkileşim anlamlı bulunmuştur ($p = 0,033$). Bu sonuç, işleme parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

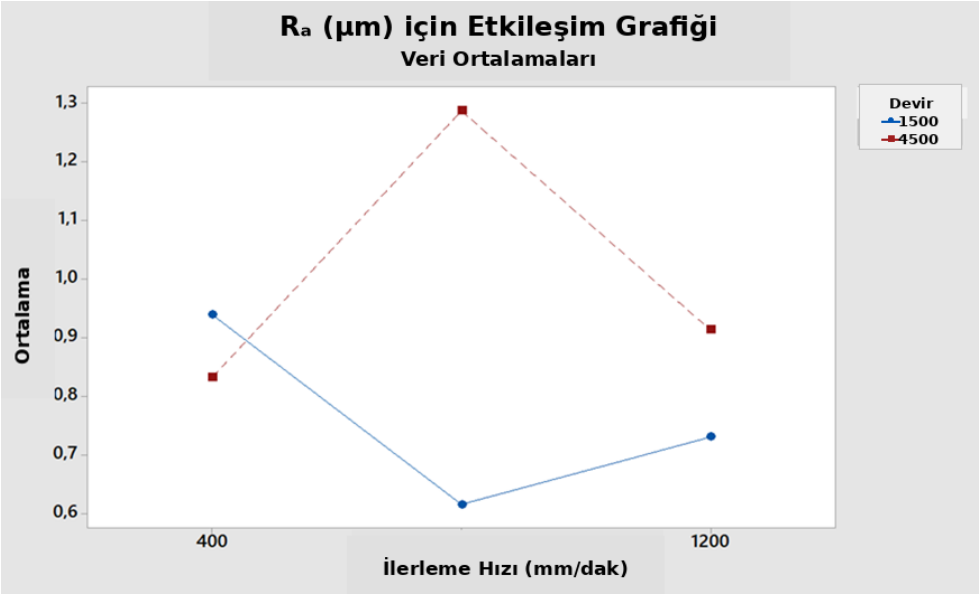
Ana etki grafiği Şekil 4.13 incelendiğinde, malzeme türü ve takım devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha belirleyici olduğu açıkça görülmektedir. PET-CF15 malzemesi, PET malzemesine kıyasla daha düşük R_a değerleri vererek daha iyi yüzey kalitesi sağlamıştır. Sonuca göre, 1500 rpm devir sayısında elde edilen R_a değerleri, 4500 rpm'e göre daha düşük seviyededir. İlerleme hızının tek başına yüzey pürüzlülüğü

üzerindeki etkisi ise belirgin değildir. Numuneler arasındaki farklılıklar, üretim koşullarına bağlı değişkenlerin yüzey kalitesini etkileyebileceğini göstermektedir.



Şekil 4. 13 Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için ana etki grafiği

Ana etki grafiği faktörlerin bireysel etkilerini ortaya koyarken, ilerleme hızı ile takım devir sayısının birlikte etkisini incelemek amacıyla etkileşim grafiği Şekil 4.14 (Interaction), ilerleme hızı ile devir sayısı arasındaki ilişkinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermektedir. İnceleme sonucunda, devir sayısının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin ilerleme hızına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Çizgilerin paralel olmaması, iki parametre arasında belirgin bir etkileşim olduğunu ifade etmektedir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek bir parametreye bağlı olarak değerlendirilemeyeceğini ve optimum yüzey kalitesi için parametrelerin birlikte seçilmesi gerektiğini göstermektedir.



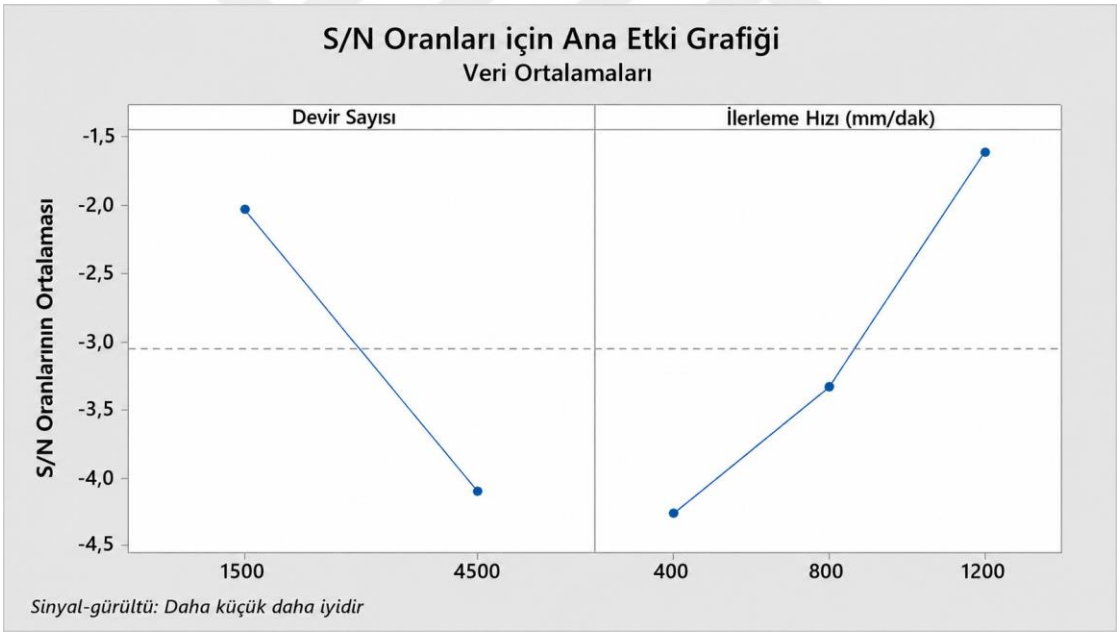
Şekil 4. 14 İlerleme hızı ve devir sayısı için etkileşim grafiği

Yapılan analizler, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreleri açık şekilde ortaya koymuştur. Bu parametreler dikkate alınarak, çalışmanın temel amacı olan yüzey pürüzlülüğünü minimize eden optimum işleme koşullarını belirlemek için Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Taguchi yöntemi, kompozit malzemelerin delik delme süreçlerinde çoklu çıktıları optimize etmek için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda eksenel kuvvetler, delik geometrisi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin Taguchi ve ANOVA analizleri ile başarılı şekilde değerlendirildiği rapor edilmiştir.[56], [57] Bu çalışmada Taguchi yöntemi, veri setinin yapısı nedeniyle tam ortogonal olmayan bir tasarım kullanılarak uygulanmış ve her malzeme için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca analizlerde “daha küçükdaha iyi” sinyal/gürültü oranı kriteri esas alınmıştır.

Gerçekleştirilen Taguchi analizinde, seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri S/N oranları ve ortalama değerler üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki malzeme için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamıştır. PET numunesi için yapılan Taguchi analizinde elde edilen S/N oranlarına göre, devir sayısı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri Tablo 4.3 ve Şekil 4.15’de sunulmuştur.

Tablo 4. 3 PET numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi yanıt tablosu

Seviye	Devir sayısı (S/N)	İlerleme hızı (S/N)
1	−2,043	−4,450
2	−4,099	−3,336
3	–	−1,617
Delta	2,057	2,833
Rank	2	1



Şekil 4. 15 PET numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi ana etki grafiği

İlerleme hızının, devir sayısına kıyasla yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha etkili olduğu açık şekilde görülmüştür. En yüksek S/N oranı, 1500 rpm devir sayısı ve 1200 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ile de Tablo 4.4'te doğrulanmıştır.

Tablo 4. 4 PET numunesi için ortalama R_a değerlerine göre Taguchi yanıt tablosu

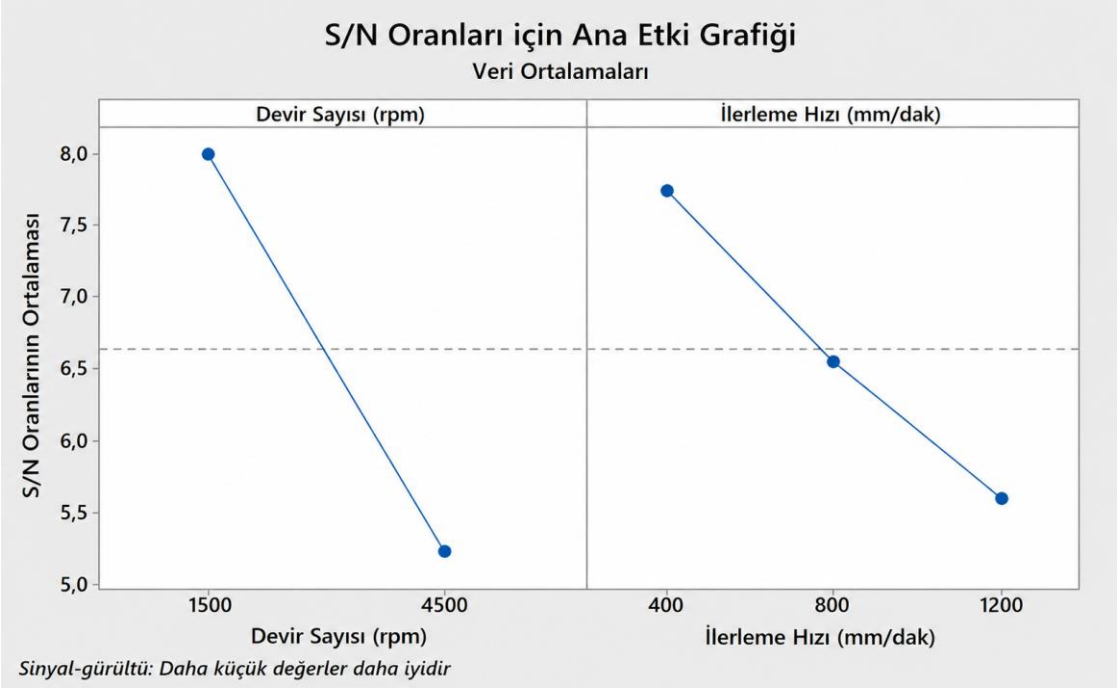
Seviye	Devir sayısı (R_a, µm)	İlerleme hızı (R_a, µm)
1	1,145	1,550
2	1,549	1,446
3	–	1,144
Fark	0,404	0,406
Önem sırası	1	2

Analiz sonuçlarına göre, PET malzemesi için yüzey pürüzlülüğünü minimize eden en uygun parametrelerin 1500 rpm ve 1200 mm/dak olduğu belirlenmiştir.

Yaptığımız Taguchi analizinde seçilen işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri S/N oranları ve ortalama tepki değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki malzeme için optimum işleme parametrelerinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. PET numunesi için yapılan analizde, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin devir sayısına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En yüksek S/N oranı 1500 rpm devir sayısı ve 1200 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Bu sonuçlar ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ile de doğrulanmıştır. Buna göre, PET malzemesi için yüzey pürüzlülüğünü minimize eden optimum parametrelerin 1500 rpm ve 1200 mm/dak olduğu sonucuna ulaşılmıştır. PET-CF15 malzemesi için gerçekleştirilen analizde ise devir sayısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmüştür Tablo 4.5 ve Şekil 4.16'da

Tablo 4. 5 PET-CF15 numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi yanıt tablosu

Seviye	Devir sayısı (S/N)	İlerleme hızı (S/N)
1	8,008	7,776
2	5,213	6,490
3	–	5,566
Fark	2,795	2,209
Önem sırası	1	2



Şekil 4. 16 PET-CF15 numunesi için S/N oranlarına göre Taguchi ana etki grafiği

En yüksek S/N oranı 1500 rpm devir sayısı ve 400 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine dayalı sonuçlar da bu bulguyu

desteklemiştir Tablo 4.6'da. Bu nedenle PET-CF15 malzemesi için optimum parametrelerin 1500 rpm ve 400 mm/dak olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. 6 PET-CF15 numunesi için ortalama R_a değerlerine göre Taguchi yanıt tablosu

Seviye	Devir sayısı (R_a, µm)	İlerleme hızı (R_a, µm)
1	0,380	0,398
2	0,525	0,458
3	–	0,502
Delta	0,145	0,104
Rank	1	2

Deneysel analizler, delik delme parametrelerinin işleme performansı üzerinde kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymuştur. Özellikle takım devir sayısı (rpm) ve ilerleme hızı (feed rate) parametrelerinin, hem kesme kuvvetleri hem de yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirleyici etkileri olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ilerleme hızlarının kesme kuvvetlerini artırdığı, buna karşılık yüksek devir sayılarının kesme sürecini daha stabil hale getirerek kuvvet değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde düşük devir sayılarının daha iyi yüzey kalitesi sağladığı belirlenmiştir. ANOVA analiz sonuçları, malzeme türünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak en etkili faktör olduğunu, bunu takım devir sayısının izlediğini ortaya koymuştur. İlerleme hızının tek başına etkisi sınırlı olmakla birlikte, devir sayısı ile olan etkileşimi anlamlı bulunmuştur. Bu durum, delik delme sürecinde parametrelerin birbirinden bağımsız olarak değil, birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Taguchi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda, yüzey pürüzlülüğünü minimize eden optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Buna göre saf PET malzemesi için optimum değerler **1**500 rpm devir sayısı ve 1200 mm/dak ilerleme hızı olarak bulunurken, PET-CF15 kompozit malzemesi için ise 1500 rpm ve 400 mm/dak ilerleme hızı en uygun parametre kombinasyonu olarak tespit edilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Elde edilen bulgular, her malzemenin işleme esnasında kendine has bir karakter sergilediğini net bir şekilde gösteriyor. Bu durum, imalat sürecinde en iyi sonucu alabilmek için parametrelerin malzemeye özel olarak optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Çalışmanın öne çıkan bir diğer çıktısı ise karbon fiber takviyesinin yüzey pürüzlülüğünü genel olarak iyileştirmesidir. Çekme testi sonuçlarına göre, PET-CF15 malzemesi saf PET ile kıyasla daha yüksek gerilme ve rijitlik sergilemiştir. Bu karbon fiber takviyesinin sünekliği azalttığı şeklinde yorumlanabilir. Delme işlemi sırasında ölçülen kesme kuvveti değerleri, işleme parametrelerine bağlı olarak değişim göstermiştir. Genel olarak ilerleme hızındaki artışın kesme kuvvetini artırdığı, yüksek devir sayısının ise kesme sürecini daha kararlı hale getirdiği değerlendirilmiştir. Delaminasyon hasarları bu çalışmada SEM/görsel incelemeler kapsamında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, özellikle PET-CF15 malzemelerinde karbon fiber takviyesine bağlı olan hasarlar delik çevresinde gözlemlenmiştir. Özetle bu tez çalışması kompozitlerin işlenebilirliğini belirleyen ana unsurun sadece malzeme özellikleri olmadığını, seçilen üretim ve işleme stratejilerinin de bu süreçte devasa bir rol oynadığını kanıtlamıştır. Bu noktada Taguchi ve ANOVA gibi istatistiksel optimizasyon araçları, hem operasyon performansını yukarı çekmek hem de maliyetleri aşağı çekmek adına vazgeçilmez birer çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Numunelerin üretim aşamasında baskı hızı, katman kalınlığı ve baskı yönü gibi faktörler dikkate alınsa da, L_8 deneysel tasarım şeması nedeniyle tüm kombinasyonlar test edilemedi. Haliyle, bu üretim değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini ANOVA ile ayrı ayrı değerlendirmek doğru bir yaklaşım olmayacaktı. Biz de ANOVA analizini, çalışmanın asıl hedefleri doğrultusunda malzeme türüne ve delme parametrelerine (devir ve ilerleme hızı) odaklamayı tercih ettik. Üretim parametrelerinin asıl etkisini tam olarak çözebilmek için, ilerleyen dönemdeki çalışmalarda daha büyük ve dengeli deneysel tasarımların planlanması yerinde bir adım olacaktır.

Bu araştırma sürecinde ulaşılan sonuçlardan yola çıkarak, gelecek çalışmalar için şu öneriler paylaşılabilir:

• Delik delme operasyonunun ardından kompozitlerin mekanik dayanımında nasıl bir değişim yaşandığı incelenirse çok daha bütünsel ve derinlikli verilere ulaşılabilir.

• Standart takımların dışına çıkılarak kademeli matkap (step drill) veya brad drill gibi farklı matkap geometrileri ile çeşitli takım kaplamalarının delaminasyon ve yüzey

kalitesi üzerindeki doğrudan rolleri araştırılmalıdır.

• Özellikle PET-CF15 gibi yeni nesil kompozitlerin işlenmesinde, soğutma ve yağlama tekniklerinin uygulanabilirliği ile bu tekniklerin sürece yansımaları detaylıca analiz edilmelidir. Bu kapsamda kuru delme koşullarına ek olarak basınçlı hava, minimum miktarda yağlama, su bazlı soğutma sıvısı ve emülsiyon tipi soğutma sıvılarının yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, termal deformasyon ve delaminasyon üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenebilir.

• Üretim aşamasında kullanılan nozul tipinin ve nozul çapının numune kalitesi üzerindeki etkisi de ayrıca araştırılmalıdır. Özellikle karbon fiber takviyeli filamentlerin aşındırıcı yapısı dikkate alınarak sertleştirilmiş çelik nozul, tungsten karbür nozul, ruby uçlu nozul ve kaplamalı aşınmaya dayanıklı nozulların kullanımı karşılaştırılabilir. Ayrıca 0,4 mm, 0,8 mm gibi farklı nozul çaplarının katman yapısı, yüzey kalitesi, mekanik dayanım ve delme sonrası hasar davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilebilir.

• Geleneksel yöntemlerin ötesine geçilerek, çok parametreli ve çok daha hassas analizler için yapay zeka ile makine öğrenmesi tabanlı modern optimizasyon algoritmalarından yararlanılabilir.

• Karbon fiber oranının etkisini tam olarak haritalandırmak adına, farklı takviye oranlarına sahip kompozit numuneler üretilerek karşılaştırmalı deneyler yürütülmelidir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen karbon fiber takviyeli kompozitlerin delik delme süreçlerini anlamak ve optimize etmek adına literatüre kıymetli bir mühendislik katkısı sunmaktadır. Buradan elde edilen bulguların başta havacılık ve otomotiv olmak üzere ileri imalat sektörlerinde daha verimli, güvenli ve yüksek kaliteli üretim hatlarının tasarlanmasına zemin hazırlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, ve S. H. Mian, "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications", *Adv. Mech. Eng.*, c. 11, sy 2, s. 1687814018822880, Şub. 2019, doi: 10.1177/1687814018822880.

[2] M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing", *Bus. Horiz.*, c. 60, sy 5, ss. 677-688, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

[3] C. Beyer, "Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing", *J. Manuf. Sci. Eng.*, c. 136, sy 6, s. 064701, Ara. 2014, doi: 10.1115/1.4028599.

[4] S. Kumar, *Additive Manufacturing Solutions*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-80783-2.

[5] I. Bahnini, M. Rivette, A. Rechia, A. Siadat, ve A. Elmesbahi, "Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, c. 97, sy 1-4, ss. 147-161, Tem. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1932-y.

[6] S. Negi, S. Dhiman, ve R. K. Sharma, "BASICS, APPLICATIONS AND FUTURE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES: A REVIEW".

[7] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, ve P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", *Rapid Prototyp. J.*, c. 14, sy 2, ss. 72-80, Oca. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.

[8] I. J. Solomon, P. Sevvel, ve J. Gunasekaran, "A review on the various processing parameters in FDM", *Mater. Today Proc.*, c. 37, ss. 509-514, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.

[9] Y. Liu *vd.*, "Effects of printing layer thickness on mechanical properties of 3D-printed custom trays", *J. Prosthet. Dent.*, c. 126, sy 5, s. 671.e1-671.e7, Kas. 2021, doi: 10.1016/j.prosdent.2020.08.025.

[10] S. Srinivasan Ganesh Iyer ve O. Keles, "Effect of raster angle on mechanical properties of 3D printed short carbon fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene", *Compos. Commun.*, c. 32, s. 101163, Haz. 2022, doi: 10.1016/j.coco.2022.101163.

[11] M. Chaudhari, B. F. Jogi, ve R. S. Pawade, "Comparative Study of Part Characteristics Built Using Additive Manufacturing (FDM)", *Procedia Manuf.*, c. 20, ss. 73-78, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.010.

[12] P. S, S. Km, N. K, ve S. S, "Fiber Reinforced Composites - A Review", *J. Mater. Sci. Eng.*, c. 06, sy 03, 2017, doi: 10.4172/2169-0022.1000341.

[13] M. K. Egbo, "A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering", *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, c. 33, sy 8, ss. 557-568, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.07.007.

[14] A. Y. Chen, S. Baehr, A. Turner, Z. Zhang, ve G. X. Gu, "Carbon-fiber reinforced polymer composites: A comparison of manufacturing methods on mechanical properties", *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, c. 4, sy 4, ss. 468-479, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.ijlmm.2021.04.001.

[15] A. Kumar Sharma, R. Bhandari, C. Sharma, S. Krishna Dhakad, ve C. Pinca-Bretotean, "Polymer matrix composites: A state of art review", *Mater. Today Proc.*, c. 57, ss. 2330-2333, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.592.

[16] S. Chauhan, "Study of Polymer Matrix Composite with Natural Particulate/Fiber in PMC: A Review".

[17] S. Chand, "Review Carbon fibers for composites".

[18] G. Özçakır, "Carbon Fiber and Its Composites: Synthesis, Properties, Applications", *Sinop Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, c. 9, sy 1, ss. 240-265, Haz. 2024, doi: 10.33484/sinopfbd.1393364.

[19] X. Huang, "Fabrication and Properties of Carbon Fibers", *Materials*, c. 2, sy 4, ss. 2369-2403, Ara. 2009, doi: 10.3390/ma2042369.

[20] M. Cao *vd.*, "Investigation of Carbon Fiber on the Tensile Property of FDM-Produced PLA Specimen", *Polymers*, c. 14, sy 23, Art. sy 23, Oca. 2022, doi: 10.3390/polym14235230.

[21] R. C. Nonato ve B. C. Bonse, "A study of PP/PET composites: Factorial design, mechanical and thermal properties", *Polym. Test.*, c. 56, ss. 167-173, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.10.005.

[22] T. Muringayil Joseph *vd.*, "Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review", *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, c. 9, s. 100673, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100673.

[23] "moisture_study_PET_CF15.pdf". Erişim: 29 Mart 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Reinforced%20Filaments/PET%20CF15/Sales%20Resources/moisture_study_PET_CF15.pdf

[24] M.-I. Blaj, S.-M. Zaharia, C. O. Morariu, M. A. Pop, M. Cosnita, ve G. Oancea, "Tensile Behavior of Parts Manufactured Using a Material Extrusion Process from

a Filament with Short Carbon Fibers and PET Matrix", *Processes*, c. 12, sy 2, s. 334, Şub. 2024, doi: 10.3390/pr12020334.

[25] M. Sujan Kumar ve R. Deivanathan, "Effect of process parameters on drilling — An overview", *Mater. Today Proc.*, c. 46, ss. 1401-1406, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.574.

[26] D. Liu, Y. Tang, ve W. L. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates", *Compos. Struct.*, c. 94, sy 4, ss. 1265-1279, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.11.024.

[27] M. Aamir, K. Giasin, M. Tolouei-Rad, ve A. Vafadar, "A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications", *J. Mater. Res. Technol.*, c. 9, sy 6, ss. 12484-12500, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.09.003.

[28] V. K. Vankanti ve V. Ganta, "Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method", *J. Mater. Res. Technol.*, c. 3, sy 1, ss. 35-41, Oca. 2014, doi: 10.1016/j.jmrt.2013.10.007.

[29] N. Geier, J. Xu, C. Pereszlai, D. I. Poór, ve J. P. Davim, "Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations", *Procedia Manuf.*, c. 54, ss. 284-289, 2021, doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.045.

[30] J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, ve M. Chen, "Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria", *Compos. Struct.*, c. 201, ss. 1076-1087, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.06.051.

[31] L. Sorrentino, S. Turchetta, L. Colella, ve C. Bellini, "Analysis of Thermal Damage in FRP Drilling", *Procedia Eng.*, c. 167, ss. 206-215, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.689.

[32] K. Palanikumar ve J. P. Davim, "Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools", *J. Mater. Process. Technol.*, c. 209, sy 1, ss. 511-519, Oca. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.02.020.

[33] K. Shunmugesh ve K. Panneerselvam, "Optimization of Process Parameters in Micro-Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp) Using Taguchi and Grey Relational Analysis", *Polym. Polym. Compos.*, c. 24, sy 7, ss. 499-506, Eyl. 2016, doi: 10.1177/096739111602400708.

[34] E. Brinksmeier, S. Fangmann, ve R. Rentsch, "Drilling of composites and resulting surface integrity", *CIRP Ann.*, c. 60, sy 1, ss. 57-60, 2011, doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.077.

[35] C. C. Tsao ve H. Hocheng, "Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, c. 45, sy 2, ss. 125-130, Şub. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.08.001.

[36] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. De Albuquerque, A. Aguiar Vieira, ve A. Torres Marques, "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates", *Compos. Struct.*, c. 92, sy 7, ss. 1545-1550, Haz. 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.10.035.

[37] A. M. Abrão, J. C. C. Rubio, P. E. Faria, ve J. P. Davim, "The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite", *Mater. Des.*, c. 29, sy 2, ss. 508-513, Oca. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.01.016.

[38] H. Pallapothu, A. K. U., ve L. P., "Micro drilling of glass fibre reinforced polymer composites", *Mater. Today Proc.*, c. 46, ss. 9252-9256, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.545.

[39] D. Kumar, K. K. Singh, ve R. Zitoune, "Experimental investigation of delamination and surface roughness in the drilling of GFRP composite material with different drills", *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, c. 2, sy 2, ss. 47-56, Nis. 2016, doi: 10.1080/20550340.2016.1187434.

[40] T. Panneerselvam, S. Raghuraman, T. K. Kandavel, ve K. Mahalingam, "Evaluation and analysis of delamination during drilling on Sisal-Glass Fibres Reinforced Polymer", *Measurement*, c. 154, s. 107462, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107462.

[41] N. Sneha ve K. Balamurugan, "Micro-Drilling Optimization Study using RSM on PLA-Bronze Composite Filament Printed using FDM", içinde *2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, Eki. 2022, ss. 1-5. doi: 10.1109/MysuruCon55714.2022.9972515.

[42] N. S. Mohan, S. M. Kulkarni, ve A. Ramachandra, "Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials", *J. Mater. Process. Technol.*, c. 186, sy 1-3, ss. 265-271, May. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.043.

[43] E. Kilickap, “Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite”, *Expert Syst. Appl.*, c. 37, sy 8, ss. 6116-6122, Ağu. 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.02.023.

[44] H. Hocheng ve C. C. Tsao, “The path towards delamination-free drilling of composite materials”, *J. Mater. Process. Technol.*, c. 167, sy 2-3, ss. 251-264, Ağu. 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.039.

[45] S. K. Karna, “An Overview on Taguchi Method”.

[46] J. Antony, “Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner”, *Sens. Rev.*, c. 26, sy 3, ss. 227-230, Oca. 2006, doi: 10.1108/02602280610675519.

[47] S. K. Karna, “An Overview on Taguchi Method”.

[48] I. Sabry, N. E. El-Zathry, R. M. Mahamood, S. Akinlabi, W. L. Woo, ve M. ElWakil, “Performance optimization of friction stir welded flanges: insights from a hybrid Grey-Taguchi method”, *Weld. World*, c. 70, sy 3, ss. 949-968, Mar. 2026, doi: 10.1007/s40194-025-02165-5.

[49] F. Zhujani, G. Todorov, K. Kamberov, ve F. Abdullahu, “Mathematical modeling and optimization of machining parameters in CNC turning process of Inconel 718 using the Taguchi method”, *J. Eng. Res.*, c. 13, sy 1, ss. 320-330, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jer.2023.10.029.

[50] Dr. K. M. J. Rashid, “Optimize the Taguchi method, the signal-to-noise ratio, and the sensitivity”, *Int. J. Stat. Appl. Math.*, c. 8, sy 6, ss. 64-70, Kas. 2023, doi: 10.22271/maths.2023.v8.i6a.1406.

[51] S. Balaji, C. Sivakandhan, P. Maniarasan, D. Deepak, K. Senthamarai, ve S. V. Alagarsamy, “Effect of process parameters on machining behaviour using S/N ratio and ANOVA analysis”, *Mater. Today Proc.*, c. 74, ss. 97-104, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.126.

[52] M. Alassaf ve A. M. Qamar, “Improving Sentiment Analysis of Arabic Tweets by One-way ANOVA”, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, c. 34, sy 6, ss. 2849-2859, Haz. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2020.10.023.

[53] S. Sharma, A. Malik, ve S. Satya, “Application of response surface methodology (RSM) for optimization of nutrient supplementation for Cr (VI) removal by Aspergillus lentulus AML05”, *J. Hazard. Mater.*, c. 164, sy 2-3, ss. 1198-1204, May. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.030.

[54] M. Amran *vd.*, “Surface Roughness Optimization in Drilling Process Using Response Surface Method (RSM)”, *J. Teknol. Sci. Eng.*, c. 66, sy 3, Art. sy 3, Şub. 2014, doi: 10.11113/jt.v66.2691.

[55] D. Vijayan, P. Abhishek, Y. G. Manoj Kumar, P. Balaji, ve P. Siva Kumar Reddy, “Optimization of Drilling Parameters of Carbon Fiber Composites Using RSM based Desirability Function”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, c. 390, s. 012076, Tem. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/390/1/012076.

[56] M. Sen, O. Eryilmaz, ve B. Bakir, “Micro drilling characterization of the carbon and carbon–aramid (hybrid) composites”, *Polym. Compos.*, c. 45, sy 6, ss. 5449-5459, Nis. 2024, doi: 10.1002/pc.28138.

[57] M. Sen, O. Eryilmaz, ve B. Bakir, “Multi-objective Process Optimization of Micro-drilling Parameters on Carbon and Carbon–Aramid (Hybrid) Fabric Composites”, *Arab. J. Sci. Eng.*, c. 50, sy 12, ss. 9535-9552, Haz. 2025, doi: 10.1007/s13369-024-09616-z.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hamid Huseynli

Yabancı Dili : İngilizce, Rusca