MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM KARBON KUMAŞ VE POLİPROPİLEN TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI VE ANALİZİ

YUNUS HÜSEYİN ERKENDİRCİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr.Öğretim Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Metin Yüksek

İSTANBUL, 2023

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES GLASS CARBON FABRİCS AND POLYPROPYLENE REINFORCED HIBYRID COMPOSITES

YUNUS HÜSEYİN ERKENDİRCİ

MASTER THESIS

Department of Mechanical Engineering

Thesis Supervisor

Dr.Öğretim Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

Thesis CO- Supervisor

Prof. Dr. Metin Yüksek

ISTANBUL, 2023

ÖNSÖZ

Kompozit tanımının temelinde kendisi olan ve tarihin her döneminde duyu organlarının keşfettiği malzemeleri ihtiyacına yönelik şekillendirebilen insanoğlu milattan önceki devirlerde kırılgan malzelerin içine hayvansal ve bitkisel kaynaklı lifler ekleyerek kompozit yapıları oluşturmuştur. Modern çağın kompozit başlangıcı 1930 yılların sonunda fiberglasın keşfine dayanır.Dünya'ya yıkıcı etkilerinin yanında bilim , teknoloji ve savunma sanayinin günümüz vizyonuna önemli şekillendirmelerde bulunan 'II.Dünya Savaşı' uçaklar ve gemilerde kullanılan fiberglas sonrasında 1953 yılında otomotiv sektöründe ve 1960'lı yıllarda ise ülkemizdeki ilk fiberglas kullanımı olarak Anadol otomobilinde kullanılmıştır. Günümüz sanayi atılımlarında başrölü temsil eden havacılık, uzay ve savunma sanayi sektörü, denizcilik, inşaat, raylı sistemler ve rüzgar enerjisi gibi alanlarda kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bugün gelinen noktada Türkiye'ye ait kompozit enstrümanları temelde sadece kompozit sektöründe 180 şirket kısmen kompozit işi yapan 800'e yakın firma ve 10000 yakın çalışan ile katma değer üreten bir sektör konumundadır. Bu konumlama ekonomik açıdan ise 1,5 milyar Avro ve 280000 tonluk kompozit malzeme üretimini temsil etmektedir.

Ancak dünyanın içine girdiği pandemi süreci tedarik kaynaklarında bozulmaya ve 'Karbon Kıtlığı' teriminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu soruna çözüm adına geliştirilen hibrit kompozitler mevcut sorunlara çözümlemeler getirebilmekte ve yeni ürün anlayışı sunmaktadır. Çalışmamızda bu sorunun sebepleri ve çözümleri detaylandırılarak sürdürülebilirlik hedeflenmiştir. Çalışma setlerini gerçekleştirdiğimiz METYX TELATEKS A.Ş ve AR-GE birimine, tez danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU, yardımcı tez danışmanım Prof.Dr.Metin YÜKSEK ve her zaman sevgisini umudunu ve desteğini benden esirgemeyen annem ve babama teşekkürü borç bilirim.

Şubat 2023 **Yunus Hüseyin ERKENDİRCİ**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **II**
İÇİNDEKİLER ..... **III**
ÖZET ..... **V**
ABSTRACT ..... **VI**
SEMBOLLER/SYMBOLS ..... **VII**
KISALTMALAR/ABBREVIATIONS ..... **VIII**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **IX**
TABLO LİSTESİ ..... **XI**
1.GİRİŞ/INTRODUCTION **1**
1.1. Literatür Taraması 2
1.2.Literatür Değerlendirmesi 9
1.3. Hibrit kompozitler ve Hibritleşme 11
1.4.Hibrit Efekt ve Etkileri 13
1.5.Hibrit Kompozitlerin Sınıflandırılması 14
1.6.Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Yöntemleri 15
1.6.1. El ile Yatırma (Hand-Wet-Layup) Yöntemi 16
1.6.2. Püskürtme İle Yatırma (Spray LayUp) Yöntemi 17
1.6.3. Ön Şekillendirilmiş (Reçine Emdirilmiş) Yatırma (PrePreg Layup) Yöntemi 18
1.6.4.Filament Sarma (Filament Wilding) Yöntemi 18
1.6.5.Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding (RTM)) Yöntemi 19
1.6.6.Vakum Yardımıyla Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)) 20
1.6.7.Pultrüzyon Yöntemi (Pultrusion) 20
1.6.8. Pres Baskı Kalıplama Yöntemi (Compression Molding) 21
1.6.9. Otoklav Yöntemi (Autoclave) 22
1.6.10.Hibrit Kompozit Üretimine Yardımcı Yenilikler 23
1.6.11.Eklemeli İmalat Yöntemi ile Hibrit Kompozit Üretimi 24
1.6.12.Otomatik Serme Sistemleri 24
1.7. Hibrit Kompozit Üzerine Yapılan Güncel Çalışmalar 25
2. MATERYAL VE YÖNTEM **29**
2.1. Kompozit Malzeme Üretimi 29
2.2.Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Fiberler ve Özellikleri 29
2.2.1. Cam Fiberler 29
2.2.2.Karbon Fiberler 30
2.2.3.Polipropilen Fiberler 30
2.3.Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kumaş Tipleri 31
2.3.1.Dokuma (Woven) Kumaş 31
2.3.2. Düz (Plain) Dokuma Kumaş 32
2.3.3.Dalgalı (Twill) Dokuma Kumaş 32
2.4. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris – Epoksi Reçine 32
2.5. VARTM ile Kompozit Malzeme Üretilmesi 33
2.5.1.VARTM Formulasyonu 33
2.5.2. Akışkan Modeli 34
2.5.3 Fiberlerin İnfüzyon Sıkıştırılması 34

2.6. Üretim Hazırlık Aşaması 34
2.6.2.VARTM Sarf Malzemeleri 35
2.6.3.VARTM Basınç Hattı Elemanları 37
2.6.4. Hazırlık Aşamasının Tamamlanması ve Üretimin Gerçekleştirilmesi 37
2.7. Mekanik Özellik Testleri ve Ekipmanları 39
2.7.1.Çekme Testi (Tensile Test) 41
2.7.2. Üç Nokta Eğme Testi (Flexural Test) 42
2.7.3.Tabakalar Arası Kayma Testi (ILSS) 43
2.7.4. Elyaf Oranı Tayini 43
2.8. Klasik Laminasyon Teorisi (CLT) 45
2.8.1.Uzama, Eğilme, Birleştirme Matrisleri 46
2.9.Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi 47
2.10.Temsili Temel Hacim Yöntemi (Representive Elementary Volume, RVE) 47
2.11.ANSYS Material Designer 48
2.11.Temsili Temel Hacim (RVE) Modelleme ve Tasarımı 49
2.12.Hasar Teorileri 51
2.13.ANSYS Pre-Post 53
2.13.1. 3 Nokta Eğme Testi Ansys Modellemesi 57
3.BULGULAR 58
3.1.Temsili Hacim Yöntemi (RVE) Çıktıları 58
3.1.1. Karbon 58
3.1.2.Cam 59
3.1.3. Polipropilen 60
3.1.4.Temsili Hacim Yöntemi (RVE) Analiz Grafikleri 62
3.2.Ansys ACP-Pre – Post Süreç Analiz Çıktıları 63
3.3.Temel Analiz-Tabaka Davranışı 66
3.4.Post Süreç Analiz İnceleme 68
3.5. Mekanik Test Sonuçları 74
3.5.1. 3 Nokta Eğme Testi (Flexural test) 74
3.5.2. Tabakalar Arası Kayma (ILSS) Test Sonuçları: 76
3.5.3. Fiber Hacim-Ağırlık Oranları, Yoğunluk Değerleri (EN:ISO 1172) 77
3.5.4.Çekme Test Sonuçları : 77
3.6. Mekanik Test Grafik Sonuçları 79
3.6.1 Çekme Testi Grafik Sonuçları: 79
3.6.2 3 Nokta Eğme Testi Grafik Sonuçları 81
3.6.3. Tabakalar Arası Kayma (ILSS)Test Grafik Sonuçları: 83
ASTM D-2344 83
3.7.Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testi: 84
3.8. Hasar Analizi: 85
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR 86
KAYNAKÇA 89
ÖZGEÇMİŞ ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ÖZET

CAM KARBON KUMAŞ VE POLİPROPİLEN TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ARAŞTIRILMASI VE ANALİZİ

Son yıllarda kompozit yapılarda kendine önemli yer bulan tabakalı hibrit kompozitler yaygın olarak VARTM yöntemi ile üretilmektedir. Literatür araştırmaları incelendiğinde karbon ve cam takviye elemanları maliyeti artırırken çok yönlü ve tokluk kazandırmak amaçlı takviye elemanı olarak kullanılan polipropilen keçe, tez çalışmasında kullandığımız hibrit setlerinin temel fikir dayanağını oluşturmuştur. Hibrit kompozitlerde polipropilen kullanımı literatür açısından emsal teşkil ederken, teknik tekstil kavramı olarak dokuma kumaşın farklı yapıları olan düz dokuma (Plain Weave) ve dalgalı (Twill) karbon takviye yapısında incelenmiştir. Ayrıca farklı katman dizilimleri olarak beş (5L) ve dokuz (9L) katmanlı veya tabakalı dört set oluşturularak plakaların, öncelikle analiz modelleleri 'ANSYS ACP' ve 'ANSYS Material Designer' ile ön tasarım oluşturulmuştur. Modelleme çıktıları ANSYS analiz modullerinde teknik tekstil şartları kontrol edilerek tasarlama imkanı sunmuştur. Ayrıca mekanik özellikler ve hibritleşmenin temelindeki 'Klasik Laminant Teorisi' analiz modellemeleri ile birleştirilerek matris denklemlerinin oluşturulması ve sonucunda tasarım katsayıları, tamamlayıcı matrisleri oluşturmamızı sağlamıştır. Sonrasında ise yöntem ve tasarım unsurları belirlenen hibrit kompozitler VARTM ile üretilmiştir. Gerekli kürleşme ve hacimsel oranlarının bulunması laboratuvar şartlarında gerçekleştirmiştir. Üretilen plakalardan ASTM ve EN ISO standartlarına uygun olarak Çekme, Üç Nokta Eğme, ILSS deneyleri için 70'e yakın numune üretilmiştir. Mekanik testler ASTM ve EN ISO standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonrasında kırılma yapılarının mikroskop görüntüleri alınarak hasar analizi yapılmıştır. Çalışma, literatür araştırmalarına göre; analiz, teknik tekstil ve mekanik özellikleri birleştiren ve farklılık arz eden bir çalışma olarak tamamlanmıştır.

Şubat 2023 **Yunus Hüseyin ERKENDİRCİ**

ABSTRACT

RESEARCH AND ANALYSIS OF GLASS CARBON FABRİC AND POLYPROPYLENE REINFORCED HYBRID COMPOSITES

Layered hybrid composites, which have an important place in composite structures, are commonly produced by the VARTM method. Considering the literature, carbon and glass reinforcement elements increase the cost, while the polypropylene felt reinforcement element, which is versatile and used for toughness, formed the basic idea of the hybrid sets we used in the thesis. The use of polypropylene in hybrid composites setting a precedent in terms of literature, as a technical textile concept, wavy (Plain Weave) and flat woven (Twill) carbon reinforcement structure, which are different structures of woven fabric, were examined. In addition, the analysis models of the plates to be created as 5L and 9L 4 sets as different layer sequences were 'ANSYS ACP' preliminary design was created with ANSYS Material Designer. The modeling outputs provided the opportunity to design by controlling the technical textile conditions in ANSYS analysis modules. In addition, the mechanical properties and the 'Classsic Laminate Theory' analysis modeling on the basis of hybridization were combined with the analysis modeling to form matrix equations and as a result, the design coefficients and complementary matrices were formed. Afterwards, the method and design elements were determined. The required curing and volumetric void ratios were found in laboratory conditions. Approximately 70 samples were created from the produced plates for Tensile, 3 Point bending, ILSS tests in accordance with ASTM and ISO standards. Mechanical tests were performed on Universal SCHIMADZU AG-IC-250 KN test machines in accordance with ASTM and ISO standards. After the study, the microscope images of the fracture structures and the damage status were examined. The study was completed as a distinctive study combining analysis, technical textile and mechanical properties according to literature research.

Feburary 2023 **Yunus Hüseyin ERKENDİRCİ**

SEMBOLLER/SYMBOLS

°C	: Derece Santigrat
Ø	: Çap [mm]
σ	: Gerilme [Pa,MPa,GPa]
$G_{1,2,12}$	: Kayma Modulü [Pa,MPa,GPa]
$\varepsilon_{1,2,12}$	: Uzama [mm/mm,%]
F	: Kuvvet [N]
$E_{1,2,12}$	: Elastik Modulü [Pa,MPa,GPa]
L	: Mesnet Uzunluk [mm]
b	: Genişlik [mm]
h	: Kalınlık [mm]
$\tau_{1,2,12}$	: Tabakalar Arası Kayma Gerilmesi [Pa,MPa,GPa]
Wf	: Fiber Ağırlık Oranı [%]
Vf	: Fiber Hacim Oranı [%]
$M_{x,Y}$	: Düzlem İçi Moment [N.m]
$N_{x,Y}$	: Düzlem İçi Kuvvet [N]
$Q_{x,Y}$, $K_{X,Y}$	: Kappa Çıkış Eğrileri
S,$\gamma_{1,2,12}$	: Kopma Dayanımı [Pa,MPa,GPa]
S_C	: Basma Dayanımını [Pa,MPa,GPa]
$\nu_{1,2,12}$	: Poisson Oranı [mm/mm]
Na	: Birimsiz
Tg	: Camsı Geçiş Sıcaklığı [°C]
Tex	: g/1000mt
K, p	: Geçirgenlik Gradyeni
∇U	: Akışkan Hız [m/sn]
μ	: Basınç Gradyeni

KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

CLT : Klasik Lamine Teori
LE : Düşük Uzama
HE : Yüksek Uzama
HS : Yüksek Dayanım
IM : Orta Seviye Dayanım
UHM : Maximum Dayanım
VARTM : Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi
RTM : Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi
PREPREG : Ön Reçine Emdirilmiş Takviye
CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM : Bilgisayar Destekli Üretim
HMNT : Yüksek Dayanım Yüksek Sıcaklık
CNC : Sayısal Kontrollü Bilgisayar
AFP : Etkileşimli Fiber Yatırma
ILSS : Tabakalar Arası Kayma
PAN : Poliakrilik
ASTM : Amerikan Test & Malzeme Birliği
EN ISO : İnglizce Uluslararası Standartlar Organizasyonu
RVE : Temsili Temel Hacim Yöntemi
ANSYS : Swanson Analiz Sistemleri
FVF : Fiber Hacim Oranı
FWF : Fiber Ağırılık Oranı
TW : Twill Kumaş Tipi
PW : Plain Weave Kumaş Tipi
PP : Polipropilen Takviye
C : Karbon Takviye
G : Cam Takviye
KÇA : Kalıp Çalışma Alanı
DSC : Diferansiyel Kalorimetre Tarama

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 : Hibritleşme 11
Şekil 1.2: Partikul ve kısa fiber hibritleşmeleri (Sohel Rana 2011)..... 12
Şekil 1.3: Dental Yapıştırıcı ve Mineral yapı Hibritleşmesi (Noor Azlin Yahya 2014)..... 13
Şekil 1.4: Al_2O_3 SiC Hibritleşmesi Mikroyapı SEM Görüntüsü (Yoshio Arai 2016) 13
Şekil 1.5: Diğer tipte hibrit sınıflandırmaları(Beşergil 2016) ve iletken tüp içinde cam karbon hibritleşmesi (Burks 2012) 15
Şekil 1.6: Sürekli/kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri [15]..... 16
Şekil 1.7: El ile Yatırma Yönteminin şematik gösterimi [Resinepoxy.ca 2017]..... 17
Şekil 1.8: Püskürtme ile Yatırma Yönteminin şematik gösterimi [Poliya.com,2022]..... 18
Şekil 1.9: Filament Sarma Yönteminin Şematik Gösterimi [18] 19
Şekil 1.10: Reçine Transfer Kalıplama Yönteminin (RTM) Şematik Yöntemi [52]..... 19
Şekil 1.11: VARTM Yönteminin Şematik Gösterimi [18] 20
Şekil 1.12 : Pultruzyon Yöntemi [18] 21
Şekil 1.13: Pres Baskı Kalıplama Driver Parçası Şematik Gösterimi (CompositeWorld 2017)..... 22
Şekil 1.14 : ASC Econclave otoklav hattının şematik ve öngörünüşünün şematik gösterimi [HairRoi 2018]..... 23
Şekil 1.15 : Adapa D300 adaptif kalıplama cihazı [19] 23
Şekil 1.16: 'CF3D' tarafından üretilmiş carbon fiber termoset matrix kaykay [20,21]..... 24
Şekil 1.17 : Otomatik Fiber Yerleştirme Makinesi (CompositeEvolution 2021) 25
Şekil 2.1 : Sırasıyla Aramid, Karbon, Cam Fiber Takviye kumaş örnekleri (Easy Composite 2022)..... 31
Şekil 2.2 : Fiberlerin basınç altında kürleşme kinematiği..... 34
Şekil 2.3 : Takviye elemanlarının kesimi 60x60 cm..... 35
Şekil 2.4 : Vakum Sırasında Kullanılan Geri Dönüş Tankı ve Pompa Spiral boru bağlantısı 37
Şekil 2.5 : Sarf malzemeler kalıp yatırma ve reçine emdirilmesi 38
Şekil 2.6 : Plaka kalınlık ve Düzlemsellik kontrolü..... 39
Şekil 2.7 : Universal Test Cihazları ve Eksenel Transverse Extansometre (ClipOn) ile Ölçüm 40
Şekil 2.8 : Kesim işlemleri bitmiş test numuneleri 41
Şekil 2.9 : Test öncesi ve sonrası çekme test numeneleri 42
Şekil 2.11 : Yakma deney numune resimleri 44
(a) ILSS test sonrası, (b) ILSS test öncesi, (c) Kalsinasyon sonrası kroze numune..... 44
Şekil 2.12 : RVE Material Designer Aşamaları [43] 48
Şekil 2.13 : Sırasıyla Tek yönlü, Plain, Twill, Karışık, Kubik ve Rastgele Latex yapıların şematik gösterimi (ANSYS Material Designer 2022)..... 49
Şekil 2.14 : Cam ve karbon fiber kumaşların filament çapı mikroskop görüntüsü..... 50
Şekil 2.15 : Ansys RVE çözümleme..... 50
Şekil 2.16 : Hata Kriterleri Cevap Oranları Kıyaslama Grafiği [47] 53
Şekil 2.17 : Solda Ansys ACP Pre Modul Ağacı, Sağda 60X60 cm plaka modellemesi ... 54
Şekil 2.18 : Ansys ACP Pre fiber ve transverse yönlendirme..... 54
Şekil 2.20 : Düzlem içi Toplam Defarmasyon..... 56
Şekil 2.21 : Statik Analiz Kompozit Hata Teori 56
Şekil 2.22 : Ansys ACP Pre Polipropilen Orta Tabaka Stress Dağılımı..... 56

Şekil 3.1 : Sırasıyla Karbon Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri..... 62
Şekil 3.2 : Sırasıyla Cam Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri..... 63
Şekil 3.4 : Cam Karbon takviye Polar Koordinat ve istif dizilimi..... 65
Şekil 3.5 : Polipropilen takviye Polar Koordinat ve istif dizilimi..... 65
Şekil 3.6 : Ön tasarım 9L Polar Koordinat ve istif dizilimi..... 65
Şekil 3.7 : Temel analiz araç çubuğu ve ön gerilme durumunda plaka davranışı..... 66
Şekil 3.8 : Maximum Stress Teori Plaka Davranışı..... 67
Şekil 3.9 : Tsai-Wu Teori Plaka Davranışı..... 67
Şekil 3.10 : Tsai-Hill Teori Plaka Davranışı..... 68
Şekil 3.11 : Hofmann Teori Plaka Davranışı..... 68
Şekil 3.12 : Ön tasarım plaka istif dizilimi ve stress dağılımı..... 69
Şekil 3.13 : Post Süreç 1. Katman Davranışı..... 69
Şekil 3.14 : Post Süreç 2. Katman Davranışı..... 70
Şekil 3.15 : Post Süreç 3. Katman Davranışı..... 70
Şekil 3.16 : Post Süreç 4. Katman Davranışı..... 70
Şekil 3.17 : Post Süreç 5. Katman Davranışı..... 71
Şekil 3.18 : Post Süreç 6. Katman Davranışı..... 71
Şekil 3.19 : Post Süreç 7. Katman Davranışı..... 71
Şekil 3.20 : Post Süreç 8. Katman Davranışı..... 72
Şekil 3.21 : Post Süreç 9. Katman Davranışı..... 72
Şekil 3.23: 3 Nokta Eğme Testi Ortalama Stress Dağılımı..... 73
Şekil 3.24: 3 Nokta Eğme Testi Ortalama Uzama Dağılımı..... 73
Şekil 3.25: 3 Nokta Eğme Kuvveti Dağılımı..... 73
Şekil 3.26: Tip 4 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 79
Şekil 3.27: Tip 3 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 79
Şekil 3.28: Tip 2 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 80
Şekil 3.29: Tip 1 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 80
Şekil 3.30: Tip 1 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafik..... 81
Şekil 3.31: Tip 2 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 81
Şekil 3.32: Tip 3 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 82
Şekil 3.33: Tip 4 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 82
Şekil 3.34: Tip 1 ILSS Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 83
Şekil 3.35: Tip 3 ILSS Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri..... 83
Şekil 3.36: Dört Tip Kompozit Malzeme DSC Sonuç Grafikleri..... 84
Şekil 3.37 : Çekme testlerinden sonra hasara uğramış numunelerin yakınlaştırılmış dijital fotoğrafları..... 85

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 : Son yıllarda yapılan hibrit kompozit çalışmaları ve incelenen özellikler 29
(De Gruyder 2022)..... 29
Tablo 2.1 : Çalışmada Kullanılan Fiber Takviye elemanları..... 32
Tablo 2.2 : Çalışmada Kullanılan Reçine ve Sertleştirici Teknik Kağıt Özellikleri (TDS) 33
Tablo 2.3 : Tez Çalışması Laminant İstifleme Planı..... 35
Tablo 2.4 : Sarf Malzemeleri ve Özellikleri 36
Tablo 2.5 : Basınç Hattı Elemanları 37
Tablo 2.6 : Plaka kalınlıkları 39
Tablo 2.7 : Plaka Yoğunlukları..... 40
Tablo 2.8 : Analiz Kısaltma Tablosu(ANSYS ACP 2022) 55
Tablo 3.1 : Karbon Takviye Mühendislik Değerleri(Constant Value) 58
Tablo 3.2 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Karbon Takviye Mühendislik Değerleri..... 59
Tablo 3.3 : Cam Takviye Mühendislik Değerleri(Constant Value) 59
Tablo 3.4 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Cam Takviye Mühendislik Değerleri 60
Tablo 3.5 : Polipropilen Takviye Elemanı Mühendislik Değerleri (Constant Value)..... 61
Tablo 3.6 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Poipropilen Takviye Mühendislik Değerleri 61
Tablo 3.7 : Ön tasarım plaka laminat mühendislik değerleri..... 64
Tablo 3.8 : Normalleştirilmiş Laminant Uzama Matris 64
Tablo 3.9 : Ön gerilmeli plaka kuvvet moment ve eğrilik değerleri 68
Tablo.3.10 : Ön tasarım 3 Nokta Eğme Sonuçları..... 72
Tablo 3.11 : Tip 1 3 Nokta Eğme Test Sonuçları..... 74
Tablo 3.13 : Tip 3 3 Nokta Eğme Test Sonuçları..... 75
Tablo 3.14 : Tip 4 3 Nokta Eğme Test Sonuçları..... 75
Tablo 3.15 : Tip 3 Tabakalar Arası Kayma Test Sonuçları..... 76
Tablo 3.16 : Tip 1 Tabakalar Arası Kayma Test Sonuçları..... 76
Tablo 3.17 : Ağırlık/Hacim Oranları 77
Tablo 3.18 : Tip 1 Çekme Test Sonuçları..... 77
Tablo 3.19 : Tip 3 Çekme Test Sonuçları..... 78
Tablo 3.20 : Tip 4 Çekme Test Sonuçları..... 78
Tablo 3.21 : Tip 2 Çekme Test Sonuçları..... 78
Tablo 3.22. DSC Camsı Geçiş Sıcaklıkları..... 84

1.GİRİŞ/INTRODUCTION

Kompozit sektörünün 2000'li yılların başından günümüze kadar gelen gelişim süreçlerinde yeşil enerji vurgusu ve diğer komponent tasarımlarındaki hafifleştirme ve maliyet ilişkisini orantılama ihtiyacı kompozit yetkinliklerinde artışı da, beraberinde meydana getirmiştir. Meydana gelen durumu dengelemek ve sürekliliği sağlamak adına, standardizasyon,üretim yöntemlerinde ve test uygulamalarındaki bütünlük sektör açısından önem arz etmektedir. Pandemi dönemindeki tedarik kırılmalarının öğretisi, tüm süreçlerden bağımsız hammadde ve sarf malzemelerinin doğru kullanımını gerektirmektedir. Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere hibritleşme ve hibrit kompozitler bu parametreleri kombine eden yapılardır. Hibrit kompozitler maliyeti düşürürken, gerinim ve darbe özelliklerini artırmanın etkili bir yöntemidir. Hibrit kompozitler aynı matris içerisinde sürekli, kırpılmış fiber yapılar, tabakalı olarak oluşturulabilirler.Tabakalı kompozitler kendi içerisinde lamine şeklinde hibritleşmeyi ifade eden intre-ply veya kumaş fiber yapısında hibritleşmeyi ifade eden intra-ply olarak ikiye ayrılırlar. Hibrit kompozitlerin şekil değişimi ve darbe özelliklerini artırmanın en iyi yöntemlerinden birisi de yüksek elastik modulus içeren bir yapıdan, sırasıyla düşük modulus içeren yapıyı istiflemektir. Çalışmamızda hibritleşme takviye elemanları olarak; cam kumaş, karbon kumaş ve sentetik polipropilen keçe kumaş kullanılmıştır. Polipropilen keçe kumaş, kimyasal maddelere karşı daha iyi direnç göstermesinin yanı sıra, daha iyi fiziksel özelliklere de sahip olan geri dönüştürülebilir malzemelerdir. Ve yine, son derece etkili çok yönlü bir malzeme olduğu için esneklik, kimyasal direnç, tokluk ve daha iyi ısı iletkenliği gerektiren uygulamalarda kulanılabilir malzemelerdir. Özellikle istifleme diziliminde bu polipropilen yapının tokluk artıcı etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Klasik Laminant Teorisi (CLT) günümüzde çok katmanlı yapıların istiflenmesinde, dizilim açılarında ve malzeme özelliklerini belirlemede, gerilim ve şekil değişimi yayılımını kullanmaktadır. CLT gerilim-şekil değişimi konseptinde elastik ve eğilme modül değerlerini tahmin edebilmemizi sağlar. Mekanik test değerleri ve sayısal analiz verileri teorinin gerçekliğini sorgulayarak hibritleşmenin önemini açığa çıkartır.

1.1. Literatür Taraması

Bu tez çalışmasında, yapılan çalışmalara referans olması, güncel metodları doğru yorumlamak ve yetkinlik artırmak amacı ile literatür taraması yapılmıştır. Ocak ~ Haziran 2022 tarihleri arasında aşağıda özetleri ve önemli noktaları içeren çalışmalar taranıp incelenmiş ve özet sonuçlar eklenmiştir.

Taş[1],Soykök[1] [1] Yapılan bu çalışmada ilk olarak, dikdörtgen kesitli cam fiber takviyeli kompozit (CFTK) profillerin ve karbon fiber takviyeli kompozit (KFTK) profillerin doğal frekansları çeşitli fiber açıları için sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak belirlenmiştir. Diğer aşamalarda ise, CFTK tabakaların ve KFTK tabakaların birbiri üzerine farklı açı ve sırada istiflenmesiyle oluşturulmuş dikdörtgen kesitli hibrit kompozit profillerin SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.Sem analizleri ANSYS Workbench ACP (Pre)modulu üzerinden yapılmışıtır.

Alice[1],Paulo[2],Sara[2]vePauloN.B[3][2] yaptıkları çalışmada eğilme ve ILSS özelliklerinde hibritleşmenin etkilerini incelemişlerdir.Çalışmanın amacında tokluk ve darbe dayanımının artırılması hedeflenmiş farklı oranlarda hibritleşme karbon,cam ve kevlar takviyelerde uygulanmıştır.Eğilme testlerinde uygulanan karbon cam oranlarında basma yüklemesi yönünde 17% toplam dayanımda 2,8% kadar artış görülmüştür.Kevlar ,cam hibritleşmelerinde levlar takviyenin çekme yönünde olması gerektiği ve kompozisyon oranın toplam ağrılığa göre %13 seviyesinde kalması şartında mekanik değerlerin arttığı gözlemlenmiştir.

Khaljiri[1] [3] ve arkadaşları yaptıkları çalışma da oksiklenmiş poliakrilik yapıların karbon,cam ve kevlar gibi yüksek performanslı takviyelerle epoksi matris hibritleşmelerini incelemişlerdir.Parametrelerde ki negatif pozitif hibritleşmeleri göz önünde bulundurarak tabaka adetleri farklı olacak şekilde 916,700 ve 899j hibritleşme değeri elde etmişlerdir.

Ayşe Öndürücü[1],Gökhan Can[1] [4] tarafından yapılan çalışmada alümina ve silika katkılı kevlar-cam elyaf/epoksi hibrit kompozit plakaların kevlar ve cam elyaf yüzeylerine uygulanan darbeler neticesinde kompozit yapıda oluşan darbe davranışları oda sıcaklığında deneysel olarak incelenmiştir. Uygulama sırasında kuvvet deplasman eğrilerine bakılarak hasar modları çıkartılmıştır.Eğriler geri sekme(kapalı eğri) nüfuziyet (saplanma) ve delinme (açık eğri) olmak üzere üç adet hata modu üzerinden sonuçlandırılmıştır.

Kumar A[1], Jeyalal[2],Kumar D[3] [5] yaptıkları çalışmada sentetik fiberlerin polimerleşme maliyetlerindeki artış sebebi ile hibritleşme özelliklerini araştırmışlardır.Birbirine

benzemeyen iki takviye olan Kevlar 49, E-camı ve karbon takviyeleri karbon orta tabakada olacak şekilde 2 takviyenin oryantasyonun laminant durumlarına göre hibritleşme özelliklerini incelemişlerdir.İstifleme dizilimlerindeki farklılıklar durumuna göre saf Kevlar 49 yapının cam,Kevlar 49 hibritleşmelerine göre 90% daha az tutulma gösterdiği belirtilmiştir.En iyi mekanik özelikler karbon Kevlar 49 hibritleşmesinde elde edilmiştir.

Berkay Karacor[1],Mustafa Özcanlı[1] [6] tarafından yapılan bu çalışmada doğal elyaf takviyeli kompozitlerin otomotiv endüstrisinde kullanımının artırılması amacıyla kenevir bazlı (Jüt) ve karbon fiber yapıların VARTM yöntemiyle hibritleşmesi sağlanmıştır.Oluşturulan bu hibrit yapıda çekme mukavemeti ,sertlik karekterizasyonu ,mikrosertlik değerleri ve yüzey morfolojosi değerleri gözlemlenmiştir.

Banapurmath, [7] ve arkadaşları yaptıkları çalışmada günümüzde son zamanlarda önemi artan doğal fiber takviyeli, kompozit yapıların sentetik kompozit yapıların yerini alması amacıyla bu çalışmayı oluşturmuşlardır.Çalışmada farklı oranlarda selülozik yapıda fiber lifler içeren kenevir ve muz tekyönlü fiberlere 4 farklı kat dizilimi uygulanarak (0/0),(0/45),(0/90) ve (+45/-45) polyester tabanlı fenolformaldehit reçine ile sıcak pres kullanılarak üretilmiştir. Çekme,eğilme,darbe ve ILSS testleri ASTM standartlarına uygun olarak uygulanmıştır.

Nega[1] Pierce[2] Yi[1]ve Liu[1] [8] yaptıkları çalışmada çevreci geri döünüşüm etkileri incelemek adına kenevir karbon takviye hibritleşmelerini SMC yöntemi ile farklı hibritleşme oranlarında üretmişlerdir.Çalışma sonucunda saf karbon takviyenin karbon-kenevir hibritleşmesine göre 4% daha fazla çekme modulu ve 14% daha fazla dayanım gösterdiğini saptamışlardır.Kenevir takviyelerin istifleme farklılıklarına göre 49% oranında darbe emici özelliğinde artış,38% oranında eleastik modul artışı ve 75% oranında dayanım artışı gözlemlemişlerdir.Çalışma sonunda maliyet hesapları yapılmıştır.

Woo-Kyun Jung[1] [9] ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 'Radar Emme Kapasitesi' (RAS) geliştirmek üzere hibrit kompozitlerin üstün özelliklerini nano yapı ile birleştirmişlerdir.Çalışmada hibrit yapıda takviye elemanı olarak cam fiber , matris yapıda ise nano boyutta karbon ile güçlendirilmiş epoksi reçine kullanımıştır.Ölçümler sırasında ve plaka üretim aşamalarında nano karbon yapının üstün bir şekilde radrasyon emici etki gösterdiği ve bu etkinin yapı içerisinde düzensiz termal deformasyonlara yol açtığı gözlemlenmiştir.

Aydın[1][10] tarafından yapılan çalışmada hibrit yapıların performanslarını arttırmak amacıyla farklı kumaşlar, farklı diziliş sıraları uygulanarak hibrit kompozit yapılar elde edilmiştir. Üretilen hibrit kompozitlerin mekanik ve dinamik özellikleri incelenmiştir.Çalışma kapsamında; Cam (C) ve Karbon (K) elyaflar kullanılarak VARTM (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama) yöntemi ile 4 tabakalı, 4 farklı diziliş sırasına sahip numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.Farklı istifleme ve standartlara uygun test sonuçlarına göre sadece karbon yapının dinamik ve mekanik özellikler bakımından en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

Swolfs[1] [11] ve arkadaşaları yaptıkları özet çalışamda giber takviyeli kompozitlerin dayanım darbe tokluk analizlerindeki eksikleri tespit etmişlerdir.Takviye hibritleşmelerinin istifleme özelliklerinin pek çok uygulamada iyileştrici etki gösterbireceleğini hesaplamaışlardır.Tabakalar arası sinerji eğiliminin mekanik özellikleri tahmin etmede göz ardı edilen bir etki olduğunu hibritleşme tanımında bu etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamışlardır.Özet sonun o yıllardaki (2014) hibritleşme trendlerini incelemişlerdir.

Sayer[1] ve Bektaş[2] [12] tarafından yapılan çalışmada karbon-cam elyaf/epoksi (hibrit) kompozitlerin sıcaklık ve artan darbe enerjisi altındaki darbe davranışları incelenmiştir. Bununla ilgili olarak iki tip tabaka dizilim açısına sahip, 8 tabakadan oluşan hibrit kompozit numunelere -20, 0, 20 ve 40°C sıcaklıklarında, numunelerde delinme meydana gelene kadar darbe enerjisi uygulanmıştır. Sonuç olarak, cam ve karbon fiberlerin -20°C'de, diğer sıcaklıklara göre daha çok gevrekleştiği görülmüştür. Buna göre her iki tip hibrit kompozit için -20°C'de meydana gelen delinme sınırı diğer sıcaklıklara göre en yüksek değerde bulunmuştur.

Michael[1] [13] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada hibrit kompozit yapılar epoxy matris fazında Kevlar, Tek Yönlü Cam, ve onların hibrit taviyeleri Kevlar Tek yönlü cam olacak şekilde modellenmiştir.Daha sonra modellemeler katı plaka ve yuvarlak delikli plaka olacak şekilde hasar modları haline ANSYS APDL kullanılarak getirilmiştir.ANSYS APDL içinde olan 'built-in failure' kriterine göre hasar ilk katmandan (FPF) son katmana(LPF) olacak şekilde 0° dan 90° kadar farklı açılarda konfügire edilerek hata eğrileri oluşturulmuştur. Sonuç olarak yuvarlak verilen hata modları katı plakara göre daha düşük değer ve eğriler oluşturmuştur.Yapılan çalışmada hibritleşme, kat dizilimleri ve farklı hata modlarının etkileri ayrı ve net grafiklerle ifade edilmiştir.

Guessoum[1] ve arkadaşları [14] tarafından yapılan çalışmada rüzgar türbin kanatlarındaki dış etkenlere bağlı delimanasyon hatalalarını tespit etmek için ultrasonik teknikler geliştirmeyi amaçlanmıştır.Çıktılar gerçek rüzgar kanatları parçalarında yapılan çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Bhat[1]ve arkadaşları [15] IOP Malzeme bilimi ve Mühendisliği konferansında yapılan makale ve sunum çalışmlarını derlemişlerdir.Güncel market trendlerini ve konuşmacıların detaylı kompozit üretim teknikleri hakkındaki çalışmalarında özetleyerek fiber takviyeli kompozitlerin yaygınlaştırılmasnı amaçlamışlardır.

Asim[1],Jawaid[2],Saba[1],Nasir[3]ve Sultan[4] [16] yaptıkları çalışmada hibrit polimer kompozitlerin üretilmesi uygulamalar ile alakalı özet makale oluşturumuşlardır.Oluşturdukları özet makalede üretim yöntemlerini detaylı bir şekilde açıklayarak mevcut geliştirmelerden bahsetmişlerdir.,

Young-Sik Joo1[1][17] yaptığı çalışmada kompozitlerin çeşitli kat dizilimleri ve farklı yükmeler altında yorulma ömür hesaplamalarını geliştirilerek yeni metodolojiler elde edilmesi amaçlanmıştır.Kompozit olarak karbon T800 serisi prepreg yapılar 304,8x 36,10 mm ebatlarında 0°,45°90° yönünde kesilerek farklı oranlarda stress oranlarına tabi tutulmuştur.Stress-Çevrim oranları temel yorulma dayanımları hesaplamaları gözetilerek uygulanmıştır.Kat dizilimleri arasındaki farklar yorulma ömürlerinin tahminini yapmak için birinci koşul olarak gözetilmiştir.

Erdem Selver[1] [23] Yapılan çalışmada doğal lif ve hibrit kompozitlerin ses absorpsiyon özellikleri ile istifleme dizilimi araştırmaktır. Vakum infüzyon yöntemiyle farklı kat dizilimlerine sahip cam/keten ve cam/jüt kumaşlardan oluşan hibrit kompozitler üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara gore dizilim sırasının kritik rol oynadığı, dış yüzeyi doğal liften oluşan kompozitlerin daha yüksek ses yutumuna sahip olduğu görülmüştür.

McDonnell[1] [29] ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kumaş takviye yapının farklı zincir , zincir triko veya tirko dikiş tiplerini kullanarak tabaka içinde kalınlık – dayanım ilişkisini incelemişlerdir.Literatürde yapıtıkları araştırmalarda ek dikiş yapılar çekme özellikleri bakımından negatif etki oluşturmuştur.Çalışmada bu negatif etkinin azaltırak kompozit yapılar için yeni dikiş tiplerinin bulunması ve bunun tekstil makinelerine kazandırılması amaçlandırmıştır.ISO 401 standartlarına göre çift dikiş zincir triko yapılar kullanım açısından efektif etkiler göstermesine rağmen kalınlık dayanım açısından uygunluğu araştırlmamıştır.Bu çalışmada cam fiber takviye yapının ISO 401 standartlarına göre çift

dikiş zincir triko yapının plaka içinde çekme kuvvetinin düşmesine rağmen darbe töleransında artış gözlemlenmiştir.

Ramakrishnan[1][30] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada keten liflerin metal malzeme ile hibritleşmesi sonucu darbe dayanımları araştırılmıştır.Çalışmada oluşturulan hibrit kompozit yapı 2x2 twill keten takviye ve feretik yapıda çelik metal ile oluşturulmuştur. Yüksek hızlı kamera ve optik mikroskop ile ölçümler yapılmıştır.Çalışma sonucunda hibrit kompozit yapı referans alınan GFRP kompozit ve monolitik biokompozit yapıya göre daha iyi darbe absorbosyonu gerçekleştirmiştir.

Dongdong Chena[1] Lib [31] tarafından yapılan çalışmada karbon bazalt cam takviye yapılarında farklı oranlarda oluşturulmuş 13 adet deney numunesinin malzeme karekterizasyonu,3 nokta eğme özellikleri ve maliyet iyileştirmeleri incelenmiştir.Hibrit laminantlar VARTM tekniği ile üretilmiştir. 3 nokta eğme özellikleri ASTM standartlarına uygun olarak karekterizasyon ise SEM mikroskobu ile yapılmıştır.Sonuçalra göre hibritleşmede basalt oranı %50 oranında olduğunda düşük özellikler göstermiştir ancak baslt oranı %75 e çıkarıldığında ise çok bir değişiklik gözlenmemiştir.

Shah[1]veChaudhary[2] [32] yaptığı çalışmada Vakum Yardımcılı Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) yönteminin akış modellemesini yapmışlar ve buna bağlı parametre,sınır şartlarını belirlemişleridir.Sadece yüksek fiber oranlarını hedefleyen ve akış modellemesi iyi yapılmayan VARTM tekniklerinin yanlış sonuç vereceğini belirtmişlerdir.Kürleşme kinematiği,reçine viskozitesi ,geçirgenlik ve kalıba tam oturma gibi teknik durumlar simulasyonlar yapılarak yorumlamışlardır.

Arjun ve arkadaşları [33] tarafından yapılan çalışmada doğal fiber takviyeli kompozitlerin elastik ve eğilme özellikleri tahmini yapılmıştır.Teorik modul değerleri klasik laminasyon teorisi dikkate alınarak ve çekme ve 3 nokta eğme deneysel test verileri ile doğrulanmıştır.Mekanik özelliklerde intre-intra katman özellikleri sınr şartlar olarak kabul edilmiş ve deneysel set tahmin değerlerinde % 11,21 ile%11,65 sapma oranına göre sonuçlar elde edilmiştir.Elde edilen sonuçlara göre modul değer tahmini yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Koruche[1] ve Patil[2] [34] yaptığı çalışmada fiber takviyeli polimerlerin çeşitli laminant plaka farklılarını incelemişlerdir. 0°/30°/-45° grafit/epoksi plakalar ve aynı takviye matris yapının 0°/90°/0° biaxial dizilimi farklı mekanik ve termal şartlar altında incelenmiştir.Plakalar CLT

ile modellemenmiş ve sonrasında makro ölçekte kayma eğilme burulma deformasyonları oluşturulmuştur.

Beylergil[35] yaptığı çalışmada genetik algoritma ile Ansys analiz modellemsini birleştirerek yorulma ve korozyon özelliklerini incelemiştir.Katman takviyeleri karbon ve cam,istifleme dizilimi 90°ile-90° arasında olacak şekilde tasarım değişkenleri oluşturumuştur.Çalışmanın amacında maliyet ve ağırlıkta azalma ve sıkışıklık matrisinin birden fazla değer göstermesi yatar.Karbon ve cam hibritleşmesinin eksantirik yüklemeler altında optimal tasarım özellikleri oluşturulmuştur.

Francisco M. Monticelia[1] [36] ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kompozitlerin hibritleşmesinde kat dizilimlerinin önemini 3D boşluk teorisi ile araştırmışlardır.Weibull yaklaşımına göre farklı gözenek varyasyonları homojenizasyonu sağlamak adına karbon ve cam için farklı porozite yaklaşımını gerektirir.Yapılan çalışmada 'ANOVA' şirketinin sonlu elemanlar teorimine dayalı simülasyon programı ile boşluk fraksiyonları kat laminasyonu şeklinde tahmin edilebilmektedir.Sonuçlara göre düşük cam fiber oranın porositeyi düşürdüğü ayrıca tabakalar arasındaki homojenizasyonu tabakalanmanın ortasında konumlandırdığı gözlemlenmiştir.

Chinta[1] [37] çalışma temel olarak hibrit kompozitlerin çekme ve eğilme değerlerinin hem ANSYS adlı sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hem de ASTM standartlarına uygun olarak sonuçlarının kıyaslamasını içermektedir.Çalışmada cam fiber / keten fiber takviye yapı Bisphenol-A(EP-306) matris yapı kullanılarak güçlendirilmiştir.Hibrit yapı el yatırma yöntemi ile oda sıcaklığında üretilmiştir.Sonuçlarda teoride klasik kat teoremi sonuçlar sonlu elamanlar yönteminde hata modları kıyaslanmıştır.

Kenani[1] [45] yaptığı çalışmada Ansys analiz sistemleri ACP içim çeşitli kompozit öğretileri oluşturmuştur.Kompozit tasarımda analiz fikirleri ve teorileri anlatan Kenani ACP modulu hakkında detaylı bilgilendirme ve geliştirme faaliyeti yürütmüştür.

Engin Erbayrak[1] [46] ve arkadaşları yaptıkları çalışmada oluşturdukları hibrit kompozit çıktıların mekanik özelliklerini ve darbe etkilerini araştırmışlardır.Çalışmada dokuma cam ve karbon takviyeler epoksi matris elemanı ile birleştirilmiştir.Çalışma setleri için sadece karbon(CFRE) , sadece cam(GFRE) ve bir cam bir karbon(HCGFRE) olacak şekilde 8 kat olarak oluşturulmuştur.Çalışma sonuçlarına göre en yüksek yük taşıma kapasitesi CFRE yapıda , kırılma noktasındaki en yüksek elastik uzama GFRE yapıda görülmüştür.HCGFRE yapıda ise dayanım açısından CFRE'ye göre daha düşük GFRE'ye göre daha yüksek

değerler gözlemlenmiştir.Ayrıca HCGFRE yapının elastik modul değeri CFRE yapıya göre %23 daha yüksek GFRE yapıya göre %125 daha düşük değer ortaya koymuştur.Çalışmada çekme test sonuçlarının numune sonrasındaki kırılma hata modları ayrıca mikroskop görüntüleri ile incelenmiştir.

Aviation Research Washington DC [47] tarafından yapılan kapsamlı çalışmada kompozit malzemelere dair hata modları incelenmiştir.Sf 1-5 arasında belirtilen teorilerin uygulanması ve formul düzenlemeleri çıkartılmış ve kıyaslama tablosu incelenmiştir..

Quanjin Ma[1][48] ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada serbest titreşimli frekans modulleri ile kevlar/cam/epoksi hibrtileşmesinin mekanik özelliklerinin tahmini yapılmıştır.Çalışmada analiz programlarının çıktıları kıyaslanmıştır.Kıyaslama sonucunda farklı analiz programlarında1.03% ile 2.30% arasında farklılık gözlemlenmiştir.

Gül[1] [49] yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında dikdörtgen kompozit plakaların sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini CLT yöntemi çıktıları elde ederek incelemiştir.Plak boyunca oluşan gerilim gerinim ve deformasyon analizleri elde etmiştir.Matris yapıda Bor epoksi,cam epoksi ve grafit epoksi kompozit malzemeler ele alınarak en az gerilme değerinin bor/epoksi malzemede olduğu belirtilmiştir.

Özakıncı[1][50] yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında düzlem gerilme durumunda simetrik tabakalı dikdörtgen kompozit plakaların analizleri mukayes fonksiyonları dahil edilecek şekilde incelenmişitir.Elde edilen sonuçlar Ansys analiz programı ile kıyaslanmıştır.Kenar Kalınlık oranı,malzeme anizotropisi,elyaf yönleme açıları katman sayıları gibi sınır şartları dikkate alınarak farklı setler oluşturulmuştur.

Chensong Dong [51] yaptığı çalışmada sonlu elemanlar analiz yönteminin kullanarak çeşitli karbon/cam hibritleştirme çalışmaları yapmıştır.Çalışmada oluşturulan hibritleşmelerin kat dizilimi ‘3 Nokta Eğme’ testlerinde kuvvet baskı yönünde ve simetri olacak şekilde [0]8C,[0]G/[0]3C,[0]2G/[0]2C, [0]3G/[0]C, [0]8G, 5 adet şeklinde oluşturulmuştur. Tüm testler FEA kıyaslamalarında ASTM D7264 standartına uygun olarak gerçekleşmiştir.Sonuçlarda hibritleşme oranı artıkça eğilme dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir.En iyi değerler ve maliyet azaltma durumu yarı yarıya cam / karbon hibritleşmede gözlemlenmiştir.

1.2.Literatür Değerlendirmesi

1) Literatür tarama sonuçlarına göre, oluşturulacak deney setleri hakkında önceki çalışmalardan fikir edinilmiş olup, diğer çalışmalarda takviye kumaş seçimlerinde detaylı teknik tekstil terimlerini kapsayıcı olacak seçimlere rastlanmamıştır. Özellikle mekanik özellikleri artırmayı hedefleyen woven (dokuma) kumaş türlerinin detaylı desen araştırmaları geliştirilmesi gerekmektedir.

2) Matris ve takviye elemanlarının üretim yöntemlerine göre birleşimi veya ayrı fazlardan tek parça oluşturmasında üretim yöntemlerinin etkisi ve takip edilen yenilikler çalışma çıktılarındaki malzeme özelliklerini incelemeye katkı sağlamıştır.

3) Hibritleşme mantığı birçok açıdan literatür taramalarında gözlemlenmiştir. Mikro, nano ve makro yapıdaki tabakalı kompozit hibritleşmelerinin farklı mekanik, termal, radar-uzay sistemleri, nem absorbisyon gibi farklı örnekler incelenmiştir. Çözümleme metodojileri bu tür örneklere bağlı olarak geniş denklemlerle tutulması hedeflenmiş olup teorinin temel denklemleri geniş perspektif çıktılar ile oluşturulmalıdır.

4) Literatür çalışmalarında birçok doğal selülözik yapı takviyesi çalışması mevcuttur. Kompozit malzemenin temelinde yatan hafifleştirme ve buna bağlı maliyet düşürme araştırmaları bu çalışmaların genelinde hedeflenmiştir. Bu tür çalışmalar genel olarak hint ve pasifik okyanusu ülkelerindeki hammadde yakınlığından kaynaklanmaktadır. Ülkemizin bu kaynaklara erişim uzaklığı maliyet denklemlerini bozucu etken yaptığı için bunun yerine çalışmada maliyeti yüksek olan lamina sayısının azaltılması, düşük maliyetli polipropilen takviye ile hedeflenmiştir. İncelenen çalışmalarda yöntemler ve çözümlemeler dikkatli bir şekilde not edilmiştir.

5) VARTM yönteminde yapılan iyileştirmeler literatürdeki iyileştirmelerle kıyaslanarak oluşturulmuştur. Kullanılan sarf malzemeleri sayesinde pres ve ek basınç ekipmanları gibi maliyet unsurlarını artırıcı etkiler olmadan plakaların çıkartılması planlanmıştır.

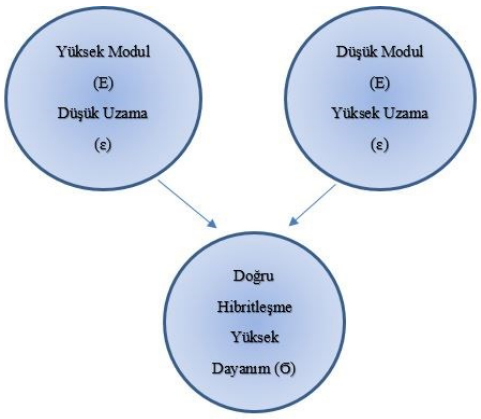
6) Literatür çalışmalarında yapılan analiz çözümleri malzemenin maliyet gerektiren test ekipmanları yerine sayısal analiz denemeleri ile fikir edinilmesini sağlamaktadır. Çalışmamızda bu yöntemler tekrar edilerek ön tasarım ürünü geliştirilmesi hedeflenmiştir.

7) Literatürde ‘Klasik Lamitasyon Teorisi’ine dair birçok çözümleme yöntemi bulunmaktadır. İhtiyaca yönelik hasar modları ve bunların mühendis bakış açısını temsil eden noktaları ele alınmalıdır. Hem sayısal analiz, hemde plakanın kalitesi ve kompozit tasarımı mükemmeliyet hedeflemeleri gerekmektedir.

8) Malzeme davranışları, üretim, hasar analiz durumları malzemin mikro seviyedeki davranışları ile ilişkilidir. Literatürde ‘Temsili Hacim Yöntemi’ RVE çalışmaları henüz daha geliştirilmeye açık bir alan olarak göze çarpmaktadır. Bu bağlamda, sayısal modelleme ve teori uygulama kompozit malzeme hibritleşmelerinde önem arz etmektedir.

1.3. Hibrit kompozitler ve Hibritleşme

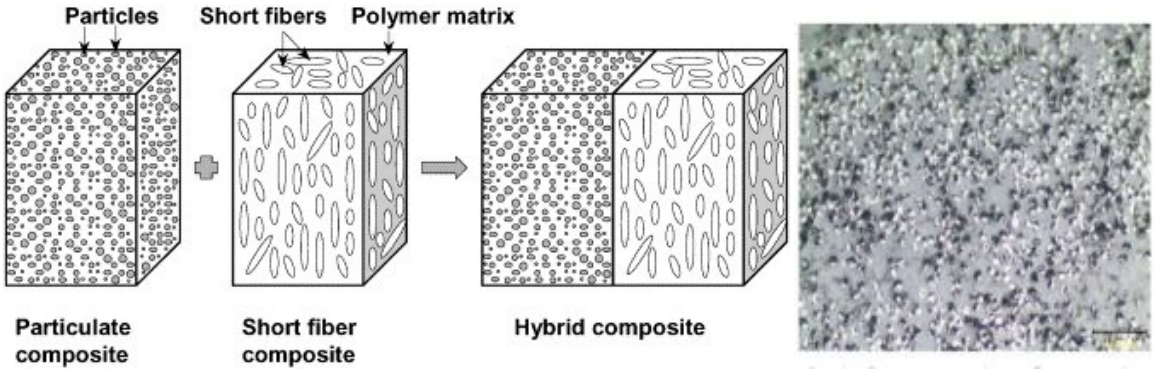
Hibrit kompozit ifadesi işlevsellik, maliyet, teori hesapları ve malzeme davranışının optimizasyonunu ifade eden karekterizasyon, kompozit çeşitlerine göre matris ve takviye fazlı kompozitler de olmak üzere birçok teriminin birleşimine dayanır. Hibrit kompoztiler partikul takviyeli kompozit sınıflandırılmasında düşünülecek olursa, konvensiyonel kompozitlerin üstün fiziksel ve mekanik özellikleriyle mikrofil (dolgu) kompozitlerin düzgün yüzey oluşumlarını bir araya getirmek için meydana getirilen kompozit türleri olduğu ortaya çıkmaktadır. Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından geleneksel kompozit yapılarla kıyaslanabilirliği artırılmış kompozitler olan hibrit kompozitler tabakalı kompozitler sınıflandırılmasında tek matriste iki veya daha fazla fiber içeren yapılardır. Çok farklı matris ve elyaf kombinasyonlarının kullanıldığı hibrit kompozitlerden en çok bilineni cam/karbon fiber takviyeli polimerlerdir.[1] Hibrit kompozitler düzgün oryantasyon, mekanik özellikler açısından dengelenmiş ve bunların tasarıma uygunlanmış hali ile nihai hedefine ulaşır.Basitçe fiber yapıların avantajları değerlendirilirken,zayıf yönleri minimize edilir. Örneğin yüksek modul ve düşük uzama fiber yapılar (karbon fiberler) yüksek yapısal bütünlük ve yük yükleme sağlarken,düşük modul ve yüksek uzama fiber yapılar (E-glass) düşük yapısal bütünlük,yüksek uzama ve darbe tokluğu sağlar (Şekil 1.1). Bu tür yapıların hibritleşmesi nihai olarak yüksek mukavemet özelliği olan kompozitler elde eltmemizi sağlar.[2] Örneğin karbon fiberler oldukça serttir, düşük yoğunlukludur. Cam fiberler karbonun sertliğine sahip değildirler. Cam-Karbon hibritleşmesinin darbe direnci yüksektir.



Şekil 1.1 : Hibritleşme

Farklı fiber yapılarda çeşitli yöntemler ile hibritleşme sağlanabilir (Şekil1.2.). Örneğin tüm fiberler dizili halde olabilir, her tip fiberden tabakalı halde istifleme ile laminasyon

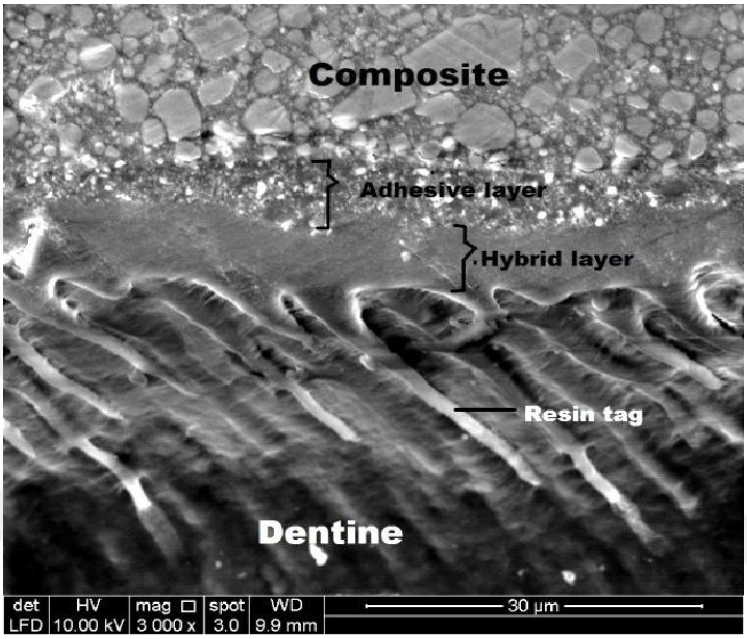
sağlanabilir. Hibrit kompozitler yük altında fiberlerin yük dağılımını sırasıyla modul değerlerine göre dağıtır.



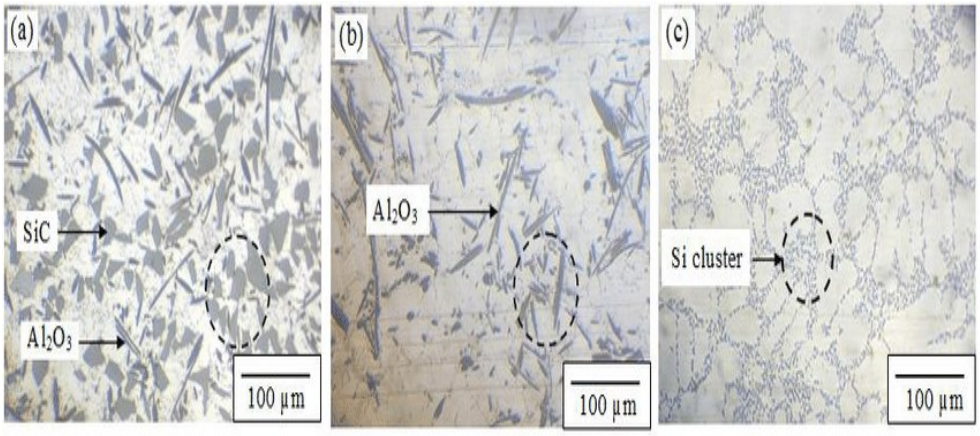
Şekil 1.2: Partikul ve kısa fiber hibritleşmeleri (Sohel Rana 2011)

Kompozit endüstrilerinde diğer elyafların kullanılması ve belirli özellikere ulaşmak için optimize edilmiş termal özellikler, dış ortam direnci v.b. farklı ortamlarda birçok araştırma türü uygun koşulların oluşturulması için yapılmıştır. Bu nedenle polimer kompozitlerde hibritleşme ile yeni özellikler sağlamak, yeni malzemeler tanıtmak için itici bir güçtür.[3] Sentetik elyaf takviyeli kompozitler makul güçlü, hafif ve dayanıklıdır.[4] Avantajlarına rağmen onlar düşük modül gibi bazı sınırlamalardan müzdariptir. Elyafın özellikleri fiber sentetik fiber takviyeler ile artırılabilir. Hibiritleşme konsepti tasarım mühendisleri için istenilen malzeme özelliklerine göre tasarım esnekliği sağlar. Sentetik fiberlerde hibritleşme sertlik, dayanım, nem dayanımı ve korozyonu önleyici özellikler katar.[5] Karbon fiberlerin yüksek maliyeti yaygınlaşması için belirli zorluklar içermektedir. Konsept arabalar ve yüksek performanslı arabalar için sentetik fiberler hem düşük maliyet hem de düşük yoğunluk ile yüksek sertlik ve dayanım imkanı sunarlar.[6] Taşıtlarda metal alaşımlar yerine sentetik fiberlerin kullanımı ile %30 kadar ağırlık ve %20 kadar maliyetten tasarruf edilebilir. Doğal fiberler ve sentetiklerin kullanımı Mercedes Benz, Ford, Toyata ve General Motors gibi firmalarda araç kapıları, paneller ön gögüsler ve ses çıkış ünitileri gibi birçok iç mekan unsurunda kullanılmaktadır. Sentetikler ve doğal fiberlerle yapılan bir çok araştırma ile yüzey modifikasyonu ve yapıştırıcıların geliştirilmesi hedeflenmiştir.Birçok parça için bu tür fiberlerin kullanımı limitasyonlar ve nem absorbisyonu sebebi ile ana kompenentlerde uygulanmamaktadır.[7] Bu yüzden hibritleşme parametrelerinin doğru kulllanımı maliyet artışını ve çevresel etkileri azaltmaktadır. Sentetik ve doğal fiberlerin birbirileri ile olan

hibritleşmeleri mekanik, nem ve ısının aynı anda etki ettiği ortamla (Hygrotermal) artırmaktadır. Farklı kombinasyonlar yüzey işlemleri ve fiber oryantasyonları birçok farklı alanda araştırılmaktadır (Şekil 1.3., Şekil 1.4.).[8] Bu alanlardan biride boşluk hibritleşmelerde kullanılan nano boyut malzemelerden radar emme kapasitesi yüksek kabuklar oluşturmaktır.[9]



Şekil 1.3: Dental Yapıştırıcı ve Mineral yapı Hibritleşmesi (Noor Azlin Yahya 2014)



Şekil 1.4: Al_2O_3 SiC Hibritleşmesi Mikroyapı SEM Görüntüsü (Yoshio Arai 2016)

1.4.Hibrit Efekt ve Etkileri

Hibritleşmenin etkileri ve efekt noktaları 'karışma kuralı'tarafından çıkarılarak pozitif veya negatif olarak hesaplanır. Hibrit etkisi birden fazla çeşitte takviye fiberi içeren bir

kompozitin özelliklerinde incelenen enerji dağıtımı (sinerjetik) bir etki olarak tanımlanır. Kompozit yapıyı oluşturan polimerler yapı itibariyle sönüm için en önemli etkenlerdir.[10]Toplam fiber yüklemesi %40 olan bir hibritleşemede gerinim-takviye eğrisi %85'i geçtiğinde pozitif hibrit etkisi gözlemlenir.[Hayashi 1972]. Hibrit efekti için iki çeşit takviye fiber düşünülünebilir.LE (Düşük Uzama), HE(Yüksek Uzama) ilk fiber olarak karşılanacak olan darbe yükü normal olarak LE de karşılanacaktır.HE fiberleri yüksek yükü karşılamak veya LE fiberlerinden daha fazla yük taşıma kapasitisine ve gerinime sahip olmak zorunda değildir.[11]

Sinerjetik etki aralığı hibritleşmede %10 ile%50 arasında görülür. Hibritleşmedeki uzama miktarı LE fiberlerinin non-hibrit durumda olan LE fiber elemanına göre kıyaslamasında gözlemlenmektedir. Bu tanımlama uzamanın referanslara bağlı olarak çözümlemesini ve kıyaslamasını gerektirir. Kopma uzama miktarı genellikle yapıdaki küçük bölümlerdeki stress dağılımı ile ilişkilidir,ancak hibrit kompozitler bu etkiden daha az etkilenme kabileyeti sağlarlar.[11] Hibrit kompozitler farklı fiber oryantasyonları, fiber matris eşleşmesi, fiberlerin karışmlarına, dizilişlerine ve miktarlarına göre değişebilir. Fiber matris hibritleşmesinin fiziksel kararlılığı, mekanik kimyasal ,termal ve sönümleme özelliklerinin incelenmesiyle hibrit etksinin performansı hesaplanır.[12,13,14]

1.5.Hibrit Kompozitlerin Sınıflandırılması

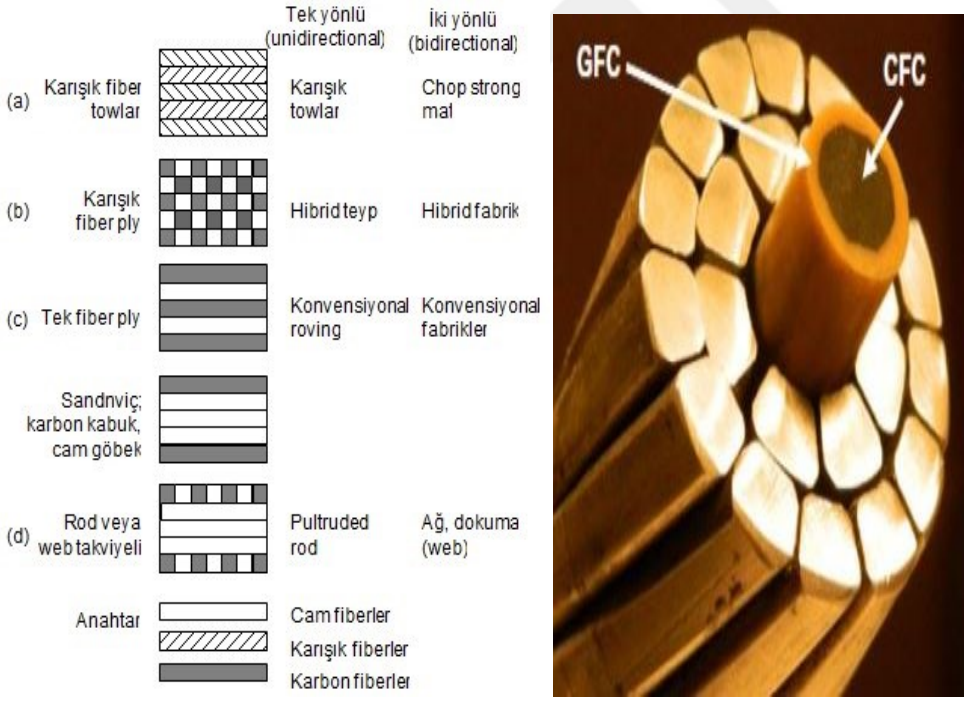
Genel olarak kompozitler takviye veya matris elemanları bakımından ayrılmaktadır. Hibrit kompozitlerde ise lamine,laminat veya intre-intra ply denilen tabakalar arası sınıflandırmalar yapılabilir. Matris ve partikül bakımından hibirt kompozitler;

- Hibrit Polimer Matris Kompozitler (HPMC)
- Hibrit Metal Matris Kompozitler (HMMC)
- Hibrit Seramik Matris Kompozitler(HCMC)
- Hibrit Nano Kompozitler (HNC)

şeklinde sınıflandırabilir.Burada nano partikül ihtiva eden hibritleşme dispers faz olarak nano kabul edilmiştir ayrı sınıfta değerlendirilebilir.[53] Diğer tip kompozitler ;

- İnterply (tabakalar arası); iki veya daha fazla tipteki fiberler düzenli istifleme veya karıştırma ile oluşturulur.

- Sandviç yapılar (Core,Shell); malzemelerden biri diğerinin iki tabakası arasına sandviçlenmiştir.Eğilme özelliklerinin gerektirdiği yerlerde kullanılır.
- İntraply (tabakalar içi); her bir tabaka iki veya daha fazla tipfiber karışımından hazırlanır.Fiber takviyelerinde kumaş bazında üretimleri yapılmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Lay-up; Bir laminantın tabakalanma konfigürasyonlarını tanımlar.(0/+-45/90)
- İstif Dizili; Tabaka kompozisyonunu oryantasyon dizilişini tamamlar daha çok seri üretimin olduğu (stack-up) yapıları modellemede bu tip hibritleşmeler olmaktadır.
- Diğer tipler; Üretim yöntemlerinin geliştirilmesine göre çeşitlendirilebilirler. Büyük partikul sınıfındaki çubuk tel takviyeler, küçük takviyeler açısından intermingled,tow açıdan internyarn gibi örnekler verilebilir (Şekil 1.5.).

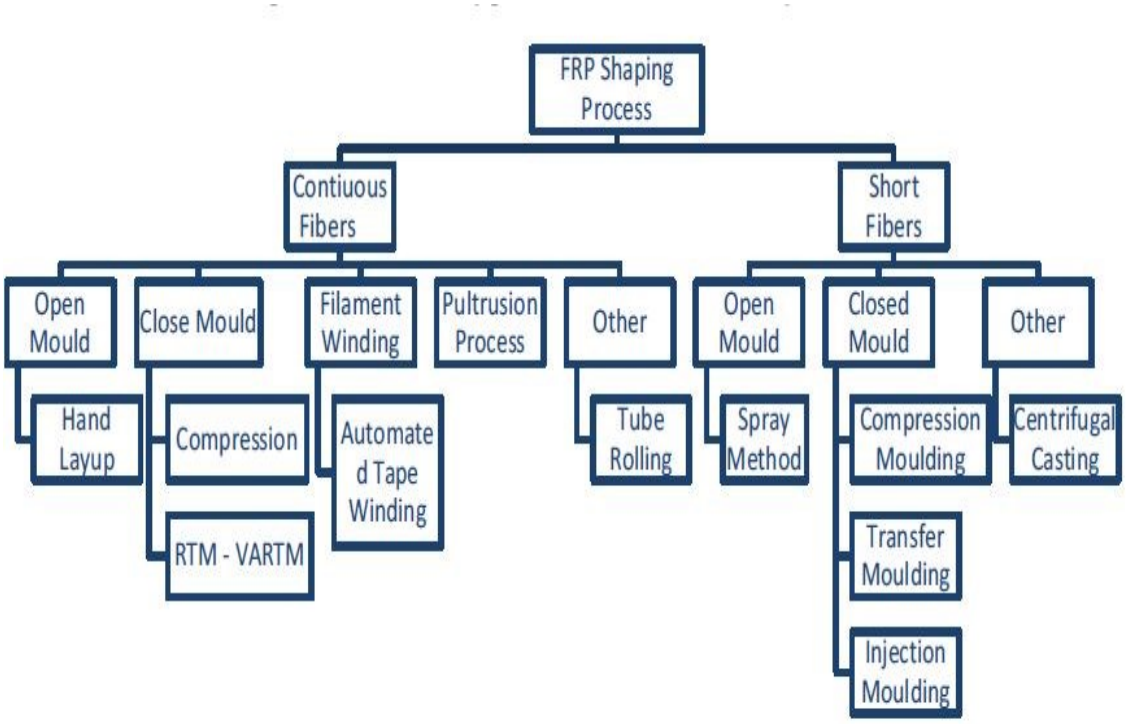


Şekil 1.5: Diğer tipte hibrit sınıflandırmaları(Beşergil 2016) ve iletken tüp içinde cam karbon hibritleşmesi (Burks 2012)

1.6.Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Yöntemleri

Hibrit kompozitler, güncellenen teknolojik gelişmelerin ve şirket patentlemelerinin çok farklı üretim yöntemleri ve inovasyon kabiliyetine sahiptir. Fiber takviyeli hibrit

kompozitlerin üretim sınıflandırmaları temel kompozit üretim teknikleri ile örtüşmektedir (Şekil 1.6). Güncelenen teknoloji ile yüzey kaltesi , tasarım kabileyeti artırılmış hibritleşmeler yaygınlaşmaktadır. Hibrit fiber takviye elemanları intra-ply düzeyde cam/karbon, şişal/kenaf gibi tow-tow teknik tekstil yapıları oluşturmaktadır. Kumaş yönlendirmelerine göre farklı açılarda (kumaş, tek yönlü, çok eksenli) tow bazlı hibrit kumaşlar üretilmektedir. Çalışmamızda kullanılan fiber takviye elemanları (carbon, cam, sentetik polipropilen mat) üretim yöntemi olarak Şekil 1.6'da ki gibi ayrılmaktadır.

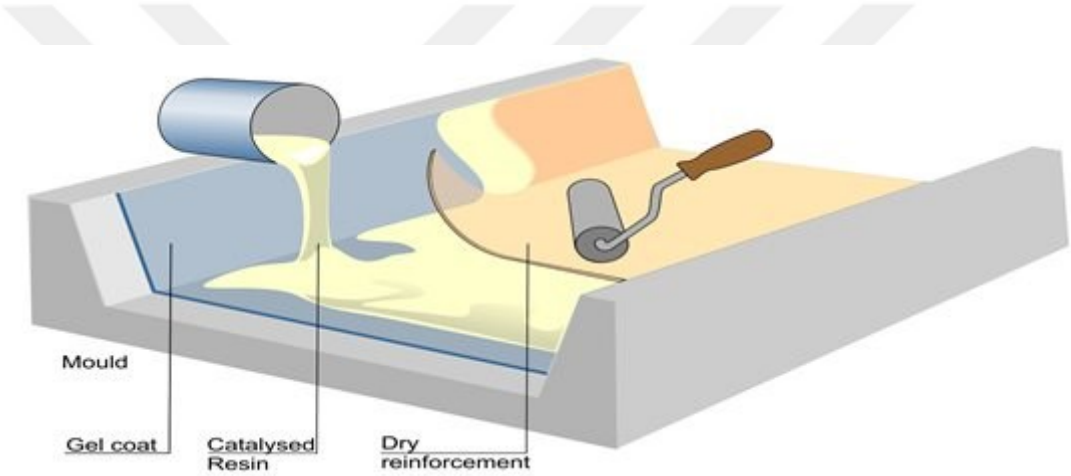


Şekil 1.6: Sürekli/kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri [15]

1.6.1. El ile Yatırma (Hand-Wet-Layup) Yöntemi

El ile yatırma yöntemi, açık kalıp kompozit üretim yöntemlerinden en yaygın olanlarından biridir (Şekil 1.7). İşlem öncesi kalıplar aseton ile temizlenir, en az 2 veya 3 kat olacak şekilde kalıp ayrıcı sprey, wax sürülür. Belirlenen istiflemeye göre mat, uniform kumaşlar kalıp içine yatırılır. Bu yöntemde reçine her tabakaya ayrı bir şekilde fırça yada roller ile yedirilir. Üretim sonrası oluşacak tabaka kalınlığı dizilimden önce

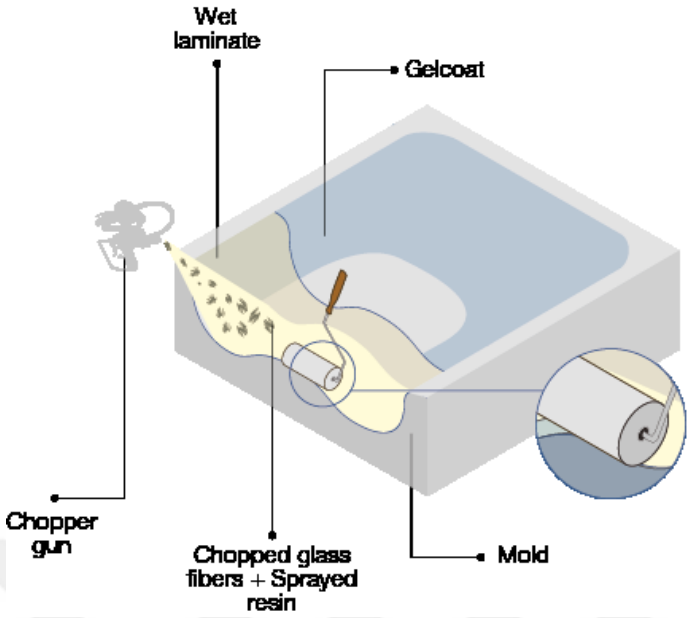
belirlenmelidir. Bu yöntem için seçilen reçine oda sıcaklığı ve nem ortamında kürleşebilmelidir. Hızlı kürleşme gerekiyorsa tasarım önceden belirlenen sıcaklıklarda kürleşmeye bırakılabilir. Üretim basit parçalar için ucuz ve daha az zaman harcanmasını engelleyen bir üretim yöntemi olsada düşük fiber hacim oranı sağladığı için tercih edilmesi ihtiyaca bağlıdır. Takviye elemanın çeşitleri dokuma, örgü, zincir, triko tiplerinde iken matris sistemi epoksi veya poliester reçinelerden oluşturulabilir. Uygulama alanları olarak rüzgar kanat ve türbin yapıları, botlar, uzay ve havacılıkta düşük öncelikli parçalar olarak otomobil parçalarından özellikle gögüs ve paneller gibi yapılarda kullanılır [15,16]



Şekil 1.7: El ile Yatırma Yönteminin şematik gösterimi [Resinepoxy.ca 2017]

1.6.2. Püskürtme İle Yatırma (Spray LayUp) Yöntemi

Eli ile yatırma yönteminden farklı olarak kısa, kırpılmış fiber gibi takviye elemanları için uygun bir yöntemdir. Kırpılmış elyaf, aktivatör, sprey yardımı ile kalıp yüzeyine püskürtülür (şekil 1.8). Açık kalıplama ve yarı otomatik bir prosestir. Püskürtücü veya roller yardımı ile reçine emdirilir ve içindeki hava boşaltılır. Üretilen parçalar reçine bakımında zengin ve ağır olup, üretim kalıbın iki tarafı için gerektiğinde kapalı kalıplama ile kapatılabilir. Bu yöntem el ile yatırma yönteminden daha hızlı bir yöntem olarak kabul edilebilir. Kompleks ve farklı ebatlarda parça üretimini düşük ve basit şekilde uygulama imkanı sunar. Yapısal paneller, karavan gövdeleri, kamyon kaplamaları, duş tekneleri, hafif botlar, davlumbaz ve havalandırma ekipmanları gibi parçalar bu yöntemle üretilebilir. [15,16]



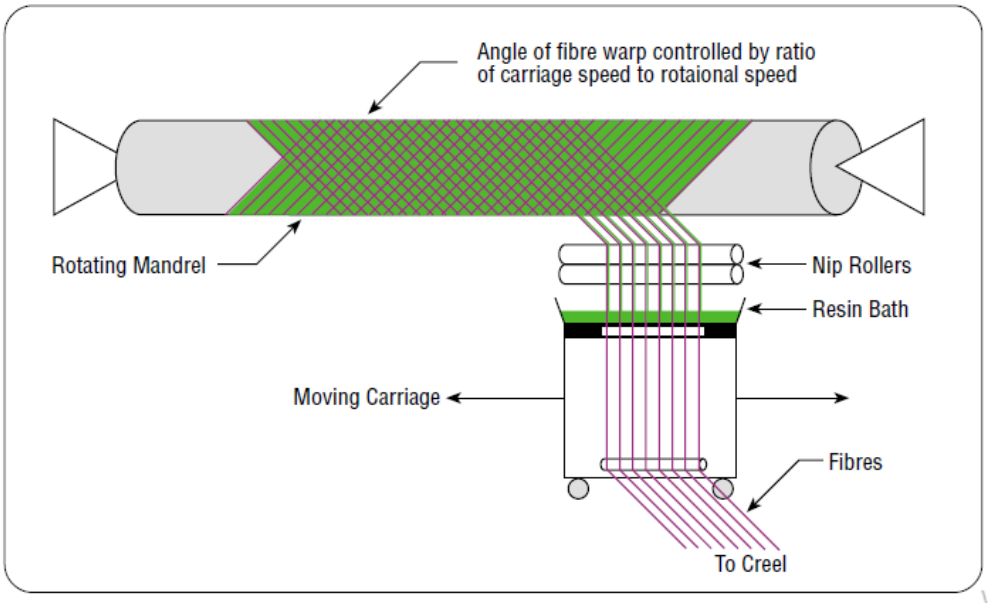
Şekil 1.8: Püskürtme ile Yatırma Yönteminin şematik gösterimi [Poliya.com,2022]

1.6.3. Ön Şekillendirilmiş (Reçine Emdirilmiş) Yatırma (PrePreg Layup) Yöntemi

Öncesinde orta derecede reçine emdirilerek (impregnated) şekillendirilmiş cam dokuma, karbon dokuma, boron dokuma, kırpılmış veya diğer yönlü fiberlerden biri kullanılarak elle yatırma işlemi uygulanılabilir. Hızlı ve iyi fiber hacim oranı sağlar. Oda sıcaklığında kürleşme sağlanır. El ile yatırmaya göre maliyeti fazladır. Pot süresi ve depolama gibi öncelikler işlem öncesinde gözetilmelidir [17]. Uzay havacılık parçaları, motospor ekipmanları, balistik ve savunma sanayi uygulamalarında kullanılabilir [15,16].

1.6.4.Filament Sarma (Filament Wilding) Yöntemi

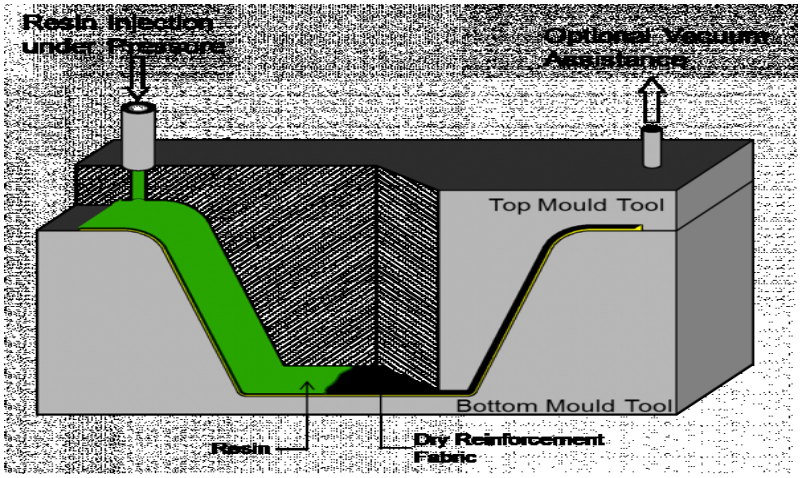
Filamentler ile yapılan açık kalıplama yöntemidir. Kalıp dönebilen mandrellerdir. Yuvarlak şekillendirmelerin verilebildiği kompozit üretim şeklidir. Mandrellere bağlı olarak iki temel hareket vardır. Kendi etrafında ve karşılıklı dönebilen mandreller istenilen şeklin ve kalınlığın verilmesini sağlar (Şekil 1.9). Sonrasında mandreller yarımı ile belirli sıcaklıklara kürleşme sağlanır. Üretilen parça hidrolik sistemler yardımı ile kalıptan ayrılır. Proses otomatik ve yüksek fiber hacim oranları sağlanabilir. Yüksek maliyetine rağmen su borularında, basınçlı tanklarda gaz silindirleri,itfaiyeci ekipmanlarında helikopter rotor şaftlarında tercih edilebilir.[15,16]



Şekil 1.9: Filament Sarma Yönteminin Şematik Gösterimi [18]

1.6.5.Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding (RTM)) Yöntemi

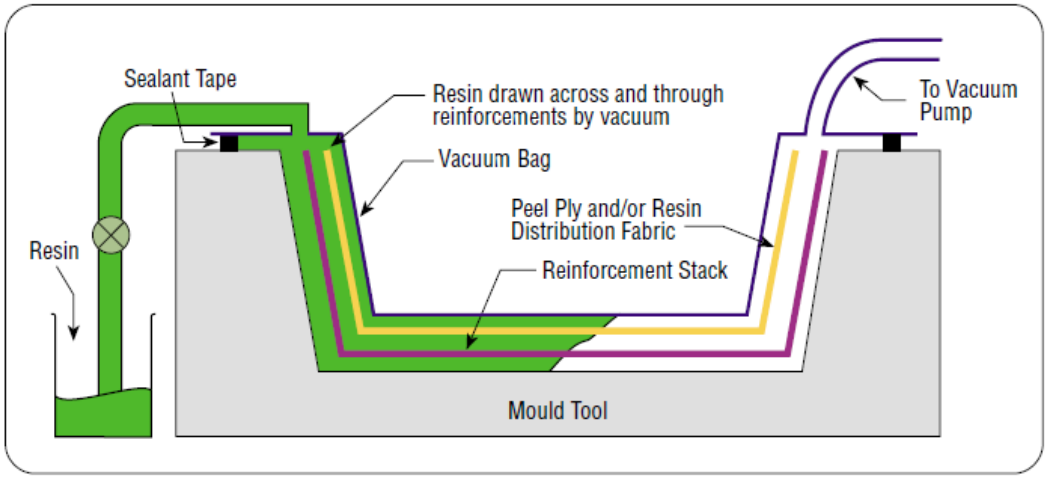
RTM bir kapalı kalıp prosesidir. Fiber takviyesi uygun oryantasyonda kalıba dizilir. Reçine yüksek basınç ile kalıba enjekte edilir. Kapalı kalıp ve yüksek basınç çift taraflı yüzey kalitesi eldesi sağlar. Farklı kürleşme sıcaklığı ve yan ekipmanların gerekliliği bu üretim yöntemini maliyetini artırcı etkidir. Lakin otoklav yöntemine göre daha az maliyetlidir. Yüzey kalitesi gerekliliği olan uçak kabin paraçaları, denizaltı ekipmanları ve anten gibi savunma ve havacılıkda kullanılan yapısal elemanlarda kullanılabilir.[15,16]



Şekil 1.10: Reçine Transfer Kalıplama Yönteminin (RTM) Şematik Yöntemi [52]

1.6.6.Vakum Yardımıyla Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM))

Bu tez çalışmasında kullanılan yöntem olan VARTM bir veya birden fazla kalıplama yerine tek ve uygunluk derecesi yüksek kalıp parçalarının kullanılmasını sağlayan RTM yönteminin varyantı ve uygulanışı daha kolay olan versiyonudur. Fiber takviye elemanı kalıp ayırıcı işlemi uygulandıktan sonra kalıp üstüne yatırılır. Soyma kumaşı, vakum poşeti, sızdırmazlık (sealent) macunu kullanılarak kalıplama yapılır. Cidarlı kaçırma kabında reçine hattı, pompa hattı ve fazla reçine tahliye hatlarının olması reçine beslemesinin kontrollü ve düzgün akışını sağlar (Şekil 1.11). Reçine akışı sistem basınıcı ile dış ortam basıncının farkı ile sağlanır. Oluşturulan parçalar kürleme işlemene tabi tutulur. Çeşitli fiber takviye ve reçine matris farklılıkları uygulanabilir. Köprü bağlantı çapraz elemanları, küçük deniz taşıtları, rüzgar türbin kanatları v.b gibi parçalarda bu yöntem uygulanmaktadır. Akademik açıdan yaygın kullanımı olan ve geliştirme aşamaları devam eden bir üretim yöntemidir.[15,16]

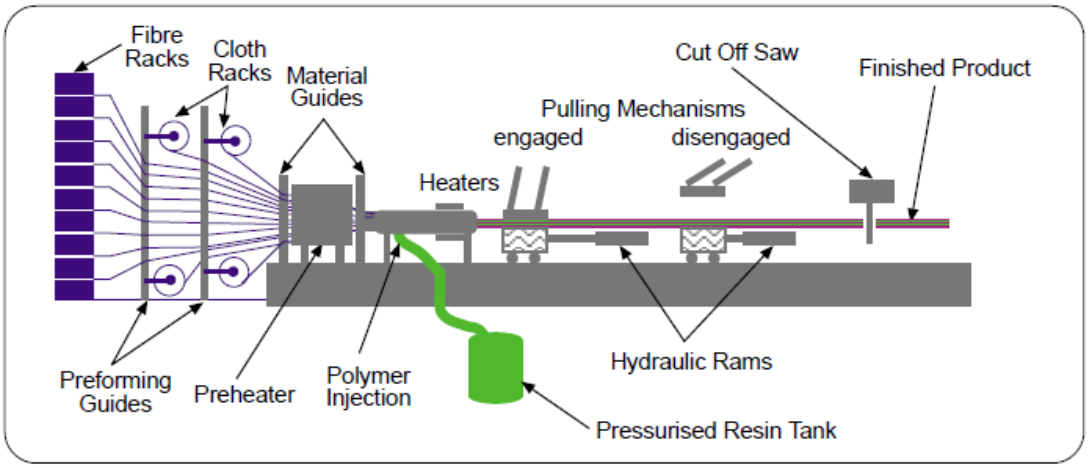


Şekil 1.11: VARTM Yönteminin Şematik Gösterimi [18]

1.6.7.Pultrüzyon Yöntemi (Pultrusion)

Sürekli fiber takviye elemanlarının kullanıldığı açık kalıplama yöntemidir. Otomasyon ve hızlı kompozit parça üretimi sağlar. Sürekli fiberlerin hat içine açılı olarak alınıdığı bölüm, reçine banyosu ve sıcak kürleme bölümü olmak üzere 3 ana har bölümünden oluşur (Şekil 1.12). Sürekli fiber takviyeleri bobinler sayesinde reçine tankIarının içine ön ısıtma eşliğinde alınır, sonrasında istenilen parça şekline ve özelliklerine göre kürleşme bölümüne gönderilir. Ekstrüzyonun aksine tüm bölümler tek döngüde çalıştırılır. Her bölüm için ayrı iyileştirmeler

ve geliştirmeler yapılarak tek kontrol paneli üzerinden yönetimi sağlanabilir. Seri ve dayanım isteyen büyük parçalar, inşaat profilleri, kolonlar, taşıyıcılar, bazı trafik ve yol güvenliği v.b. gibi ürünlerin üretilmesinde önemli rol oynar.[15,16] Bu yöntemde reçine içeriği iyi konrol edilebilir. Takviye fiber çözgü cağlıklarından geldiği için kayıp az maliyet düşürülür. Oluşturulan tabakalı yapıların fiber yapıları dispers düzeyde düzgün ve yüksek fiber hacim oranlarına sahiptir. Dezavantaj olarak tasarımda kesit parçalar kullanılması gerekliliğidir. Mevcutta her tasarım kısmı için ayrı geliştirmeler mevcuttur. Örneğin, kürleşme sonrasında elde edilen plaka yapıların depolanması ve prepreg halde kullanımı için ipli soyma kumaşı yerine plazma laser teknolojisinin kullanımı verilebilir.



Şekil 1.12 : Pultruzyon Yöntemi [18]

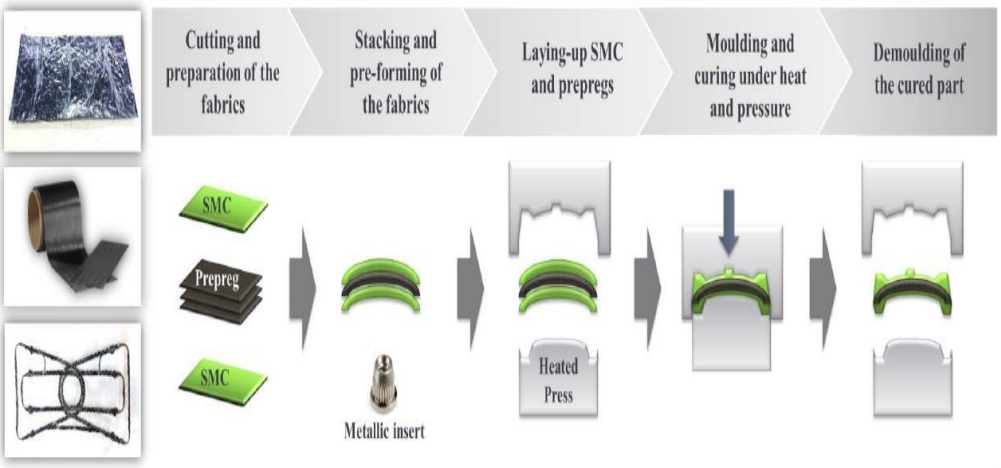
1.6.8. Pres Baskı Kalıplama Yöntemi (Compression Molding)

Temel olarak bu yöntemde 3 parametre mevcuttur; Basınç, Zaman (kürleşme süresi) ve Sıcaklık Şekil 1.13). Parametreler parçanın kalınlığına ve şekline göre değişebilir. Kendi içinde

- Kalınlık Bazlı Kalıplama (TMC)
- Saç Bazlı Kalıplama (SMC)
- Karışım Bazlı Kalıplama (BMC)
- Islak Yatırma ile Kalıplama (WMC)

(WMC) tipi pres kalıplama yönteminde üst kalıp hareket edebilirken alt kalıp çıkarılabilir şekilde tasarlanır. Basma yükü hidrolik pres ile uygulanır. Sıcaklık ve zaman parametreleri tek otomoasyon ile önceden belirlenerek ayarlanabilir. Termoset yapılar için genelde karışım bazlı kalıplama (BMC) ve saç bazlı kalıplama (SMC) genel olarak kulanılır. Presleme işlemi

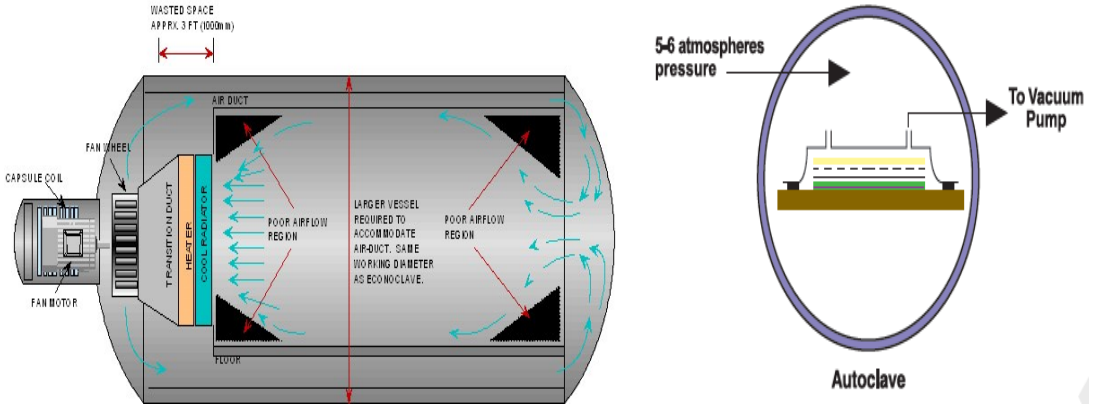
soğuk olarak gerçekleştirildiğinde seçilen matris takviye düzeni oda sıcaklığında kürleşebilirken, sıcak olarak gerçekleştiğinde kalıplama esnasında kürleşme gerçekleştirilerek zaman-üretim oranları artırılmaktadır. Kırpılmış elyaf, dokuma kumaş, kısa fiber yapılar, termoset ve termoplastik yapılar ile yekpare kompozit malzeme oluşturabilir. [15,16]



Şekil 1.13: Pres Baskı Kalıplama Driver Parçası Şematik Gösterimi (CompositeWorld 2017)

1.6.9. Otoklav Yöntemi (Autoclave)

Fiber takviye yapılarının ısı transfer dağıtım kapasitesi en geniş üretim yöntemlerinden biri otoklav yöntemidir. Otoklav üretim yönteminde (Şekil 1.14) silindirik bir üretim kazanı üstün teknolojik reçine, katalizör ve sıcaklık sistemleri ile üretim-kürleşme üzerinde kontrol sağlamaktadır. Fiberler önce reçine emdirilmiş ve ön şekillendirilmiş bir durumda (PrePreg) otoklav kazanına alınır. Sonrasında ihtiyaç var ise katalizörler belirlenen zaman-sıcaklık denkleminde emdirilir. Ancak depolama süresini uzatmak için kalıp üstünde genelde 120~180 °C sıcaklığında kürleşme sağlanır. Bu sayede reçinenin yeniden akış ve 5 atm basınca kadar basınç uygulanması ile sağlanır. Isıya daha dayanıklı termoset matris reçinelerin kullanılmasına uygun olup, ve yine çeşitli sandviç fiber takviyelerini kullanma kabiliyetine sahiptir. Düşük boşluk oranı ve yüksek fiber hacim oranı sağlar. Üretim hattı olarak çalışanı kimyasallar zararlardan koruyan bir üretim çeşididir. Reçine sistemleri çok iyi ayarlanabilir. Otomasyon ve hızlı üretim için uygundur. [18,16]



Şekil 1.14 : ASC Econclave otoklav hattının şematik ve öngörünüşünün şematik gösterimi [HairRoi 2018]

1.6.10.Hibrit Kompozit Üretimine Yardımcı Yenilikler

- Adaptive Moulds (Yenilikçi Kalıp Sistemi)

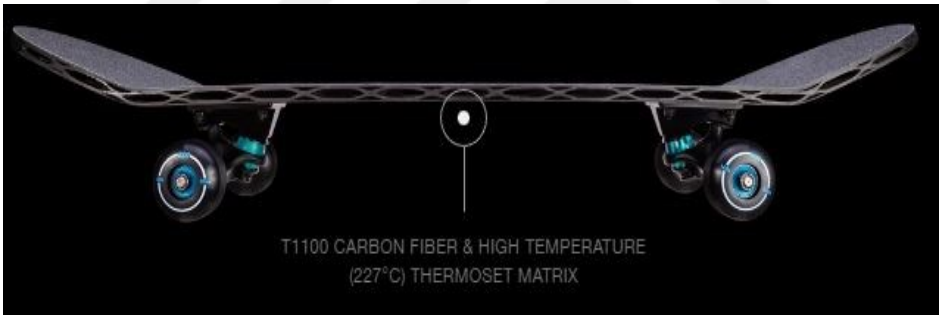
Danimarka merkezli bir şirket olan 'ADAPA' dünyanın bir çok farklı yerinde merkezi ile kalıba dayalı üretim sistemlerinin yer aldığı tüm matris fiber birleşiminin daha reçine yönetilebilir olmasını sağlamaktadır. Sektörde bilinen birçok firma ile işbirliği bulunan 'ADAPA' Şekil 1.15 de görülen sistemde, hem reçinenin istenilen yönlerde akarak kaliteli ve optimize edilmiş kompleks geometrilerde nihai kompozit üretimi sağlamakta hem de zaman içerisinde üretim hattında maliyet düşürmeyi ve sürdürülebilirliği sağlamaktadır.[19]



Şekil 1.15 : Adapa D300 adaptif kalıplama cihazı [19]

1.6.11.Eklemeli İmalat Yöntemi ile Hibrit Kompozit Üretimi

Günümüzde eklemeli imalat yöntemleri gün geçtikçe konvensiyonel imalat yöntemlerine alternatif olarak kendine yer edinmektedir. Birçok geometrik açıdan zor ve maliyeti yüksek parçayı, düşük maliyetle tasarlama imkanı sunar. 'CFD3', 'HP've 'MarkForged' gibi eklemeli imalat şirketleri eklemeli imalat alanında değerli, yıkıcı inovatif etkiler sunan teknolojiler geliştirmektedir (Şekil 1.16). Kompozit üretiminde kalıp ihtiyacını ortadan kaldıran otoklav üretim yönteminin kendisini saf dışı bırakarak, sadece lamine teorisiyle üretim yapmanın zorunluluğununu ortadan kaldıracak imkanlar sunmaktadır. Materyal optimizasyonu tek kalemde toplayan bu üretim yöntemi CAD CAM programları ile 3D baskı makinelerinin yazılımını ortak noktada birleştirebilmektedir. Üretim ana hammaddeleri her şirket için ayrı üretim kabiliyeti oluşturur. Kısa, sürekli fiberler, yüksek dayanım ve yüksek sıcaklık (HMHT) takviye elemanları ile termoset ve termoplasitk reçine kullanımına uygundur.[20,21]



Şekil 1.16: 'CF3D' tarafından üretilmiş carbon fiber termoset matrix kaykay [20,21]

1.6.12.Otomatik Serme Sistemleri

Kompozit yapılar büyüdükçe ve daha karmaşık hale geldikçe yüksek hacimli ve hassasiyetli yatırma yöntemlerine talep artmıştır. Otomatik elyaf yerleştirme, otomatik katman yerleştirme ve sonrasında nihai üründen otomatik kesim, örtüleme ve benzeri bir çok işlem olmak üzere büyük kompozit laminantları beklenenden daha kısa sürede üretmesine olanak tanır (Şekil 1.17). Otomatik fiber yerleştirme ve otomatik yapıştırıcı yerleştirme işlemleri için tasarlanmış prepreg formatlar tüylenme ve reçine birikmesini en aza indirecek makine aksama süresini azaltacak ve toplam verimi artıracak şekilde optimize edilmiştir. Tüm işlemler 4 aşamaya ayrılır. Sıkıştırma silindirli kafa, bant besleme sistemi, kafayı tutan robotik mekanizma, insan makine arayüzü. Konvensiyonel üretimdeki bilgisayar sayısal

kontrolü (CNC) gibi AFP ile bir parçayıı çevrimdışı olarak simule etmek mümkündür.Bileşik tasarım yazılım araçları,nihai üretim sürecine doğrudan geçişe izin vererek,ürün geliştirme döngüsünün başlarında AFP üretim gereksinimlerini dikkate alır [22]



Şekil 1.17 : Otomatik Fiber Yerleştirme Makinesi (CompositeEvolution 2021)

1.7. Hibrit Kompozit Üzerine Yapılan Güncel Çalışmalar

Doğal lif takviyeli kompozitlerin son yıllarda kompozit üretiminde geri dönüşüm ihtiyacının ortaya çıkması, estetik açıdan güzel görünümlü ürünler üretilebilmesi ve iyi akustük özelliklere sahip olması nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır.[3] Hibrit kompozit üzerine yapılan akademik çalışmalar dergi özetleri, konferanslar ve seminerlerde belirli zaman aralıklarında toplanmaktadır. Aşağıdaki tabloda De Gruyder dergisinin 'Hybrid Composites:Processing, Characterization,and Applications' 2022 yılında yaptığı derleme çalışmada son yıllarda yapılan çalışmalar ve incelenen özellikler Tablo 1.1 de derlenerek verilmiştir.

S.No	Hibrit Kompozit Sistemler	İncelenen Özellikler
1	Keten Epoksi Prepregler Ve Alternatif Keten/Cam Takviye Tabakları	Çekme-Yorulma Davranışı
2	Karbon Fiber(CF),Polietheretherketon(PEEK) Ve Metalik Kablo Dağıtımı	Çarpışma Testi
3	Cam/Karbon Epoksi Hibrit Kompozit	Psedo-Sünek Stress-Uzama Davranışı
4	Epoksi Tabanlı Hibrit Kompozitler	Üretim Yöntemine Bağlı Mekanik Özellikler Ve Yanma Davranışı
5	Doğal Hibrit Fiber Takviyeli (NF) Polimer Kompozitler	Su Emme Özelliği Gözetilerek Mekanik Ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi
6	Bitki Fiber Polimer Kompozitler	Matris Ve Fiber Temas Yüzeyi Ve Mofolojisi,Kristalleşme Dispers Analiz Ve Polimer Matrisin Davranışı
7	POSS Tabanlı PLA Hibrit Kompozitler	PLA ve PLA Tabanalı Karışımların Reolojik,Termal,Mekanik Ve Morfolojik Özellikleri
8	Tütüm Ürünleri Unu/Magnezyum Oksit Sülfat Whiskers Takviyeli Hibrit Kompozitler	Antibakteriyal ,Termal Ve Mekanik Özellikler

9	Karbon/Dolgu Tabakalı Bioepoksi Hibrit Kompozitler	Geometrik Düzgünlük,Mekanik Termal Ve Morfolojik Performans
10	Zif Tabanlı Grafen Oksit Kompozitler	Cvd Yöntemi Özellikleri
11	Al-Al_2O_3-WS_2 Hibrit Kompozitler	Yapısal Ve Mekanik Özellikler
12	Organik Epoksi Silikson Matrisli Boron Nitrid/Küresel Alüminyum Oksit Hibrit Kompozit	Termal İletkenlik
13	Polilaktik Asit Hibrit Kompozit	Keten Dimerleşmesinin Kimyasal ve Termal Etkisi
14	Manganoksit Ve Porozif Karbon Hibrit Kompozitler	Manganoksitin Dielektrik Etkisi
15	Çelik / Karbon Takviyeli Hibrit Kompozitler	Mode 2 Ve Mode 1 Yüzeysel Kırılma Sertlikleri
16	Karbon Fiber Hibrit Kompozitler	Termal Transport Performansı
17	Karbon/Rami Fiber Epoksi Hibrit Kompozitler	Fiber İstifleme Ve Oryantasyon Quasi-Statik Girinti Özellikleri
18	Yenilikçi Hibrit Epoksi Matris Kompozit	Alkalin Etkisi ve Ağırlıkça Fiber Oranı Belirlenmesi
19	Çim Özütü – Kırmızı Çamur Takviyeli Hibrit Kompozitler	Aşındırıcı Giysi Performansı
20	Hint Bademi-Kenaf Fiber Takviyeli Hibrit Kompozitler	Mekanik Ve Biyolojik Bozulma Koşulları

21	Hibrit Fiber Takviyeli Kompozitler	Üretim Geliştirme Ve Hibritleşme Parametreleri
22	Kevlar Ve Doğal Fiber (NF) Hibrit Kompozitler	Sıvı Kaydırıcı Giysi Özellikleri
23	Alimüna Ve Grafen Takviyeli Alüminyum (Al) Hibrit Nanokompozitler	Tribolojik Davranışların İncelenmesi
24	Karbon Nanofiber Temelli Çimento Kompozitler	Çekme Testi Duyarlılığının Artırılması
25	Keten/Karbon Fiber Takviyeli Poliamid 66 Takviyeli Hibrit Kompozitler	Termal Ve Mekanik Özellikler
26	Kısa Şişal Ve Beşgen Hexogonal Boron Nitrit Epoksi Hibrit Kompozitler	Yüksek Performanslı Mikroelektronik Uygulamalar
27	Al/Cu_p,Si/C_p,Ti/C_p Takviyeli Hibrit Kompozitler	Mikroseviye Mekanik Özellikler
28	Al-Sİc Grafit Hibrit Kompozitler	Termal Şok Ve Elastik Özellikler
29	3D Grafen Oksit Hibrit Kompozitler	Fototermal Efekt
30	Kevlar Fiber ve Nano-SiO_2 Hibrit Kompozitler	Fiziksel Ve Mekanik Özellikler
31<	Al6063/B_4C/$ZrSiO_4$ Hibrit Kompozitler	Su Jeti Özellikleri

32	Karbon Fiber Takviyeli Palimiye /Şişal Hibrit Kompozitler	Mekanik Ve Morfolojik Özellikler

Tablo 1.1 : Son yıllarda yapılan hibrit kompozit çalışmaları ve incelenen özellikler (De Gruyder 2022)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kompozit Malzeme Üretimi

Çalışmamızda, tex ve sizing değerleri birbirine yakın oranlarda cam kumaş ve karbon kumaş fiber takviye malzemeleri kullanılmıştır. Literatür araştırmaları ve firma içi yenilik çalışmaları gözetilerek dokuma (woven) kumaş tipinin farklı desenleri olan düz dokuma (Plain Weave) ve dalgalı dokuma (Twill) karbon kumaşlar kullanılarak iki farklı tip ve iki farklı kalınlıkta (5L ve 9L) ve yine her birinin ortasında sentetik darbe emici olarak düşünülmüş reçine zenginliği sağlayacak Polipropilen dokumasız (nonwoven) kumaş kullanılarak 'VARTM' yöntemindeki yenilikçi metod iyileştirmelerinden faydalanılarak 4 farklı set kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen plaka setlerinden gerekli kompozit numune çıktıları standartları göre hesaplamaları yapılmıştır. Çalışma yenilikçi bir çalışma olarak tasarlandığı için öncesinde ve sonrasında sonlu elementler analizi yöntemi kullanılarak çalışma setleri hakkında ön tasarım ve fikir elde edinilmiştir. Sonrasında oluşturulan 4 farklı setten 'CNC Router'da 70 den fazla test numunesi oluşturularak mekanik özelliklerini incelemek için Çekme, 3 Nokta Eğme, ILSS testleri standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Plaka üretiminde ve test uygulamalarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2.2.Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Fiberler ve Özellikleri

2.2.1. Cam Fiberler

Günlük hayatta kullanılan cam benzer malzemelerin karıştırılması (kum, kaolin, kalsit, kalomenit) 1600°C işlenmesi ile sıvı cam oluşur. Bu sıvı mikro küçültme ve düzenli soğutulmasıyla 5-24 μm çapta cam fiber filamentleri meydane gelir. Yakınlaştırılmış (strand) veya uzaklaştırılmış (roving) filamentleri, kohezyon ve abrasyondan koruyan 'sizing' işlemleri ile oluşturulur. İstenilen özelliklere göre birçok cam fiber çeşidi üretilebilir hale gelmiştir.

Temel takviye çeşidi olarak;

E-Camı : İyi çekme ve basma dayanımı ve uzama oranları ile beraber iyi elektiriksel özellikte göstermektedir. Diğer cam tiplerine göre daha düşük maliyetli iken darbe tokluğu açısından nispeten düşük değerler sergiler. Üretililen cam tipleri içerisinde en yaygın kulllanılan tiplerden biridir.

C-Camı: Kimyasal açıdan en direnci gösteren cam fiber çeşididir.Genele olarak yüzeysel hassaiyet isteyen ve dış tabakaların kimyasal korozyon isteyen su boruları ve tanklarda kullanılır.

R, S veya T Camı : Her biri için üreticinin adını alan bu cam filament çeşitleri E cam çeşidinden daha yüksek mekanik özellikler sergilerler. Ayrıca benzer çaplarda daha yüksek ILSS ve ıslanma özelliği gösterirler. Bu cam çeşitleri uzay ve havacılık endüstrileri ve yüksek balistik uygulamalarda kullanılır. Maliyet olarak diğer cam çeşitlerine göre daha yüksektir.[24,25]

2.2.2.Karbon Fiberler

Karbon fiberler organik karbon zengin yapıların oksidasyon, karbonlaşma ve grafenleşme işlemlerinin optimizasyonu sonucu üretilir. Temel maddelerden en bilineni poliakralik (PAN) en iyi karbon fiber özelliğini vermektedir. Ancak, fiberler zift veya selülozdan da üretilebilir. Grafenleşmenin sıcaklık oranları (2600°C-3000°C) olarak değişmektedir ve bu aralıkta yüksek dayanım ve elastisitide değerleri elde edilebilir. Isıl işlem sonrası karbon fiberlere matris yapı bağları ve kimyasal haşıl (sizing) özelliklerini elde etmek için yüzeysel işlemler uygulanır. Karbon fiberler genel olarak elastik özelliklerine göre; yüksek dayanımlı (HS), orta seviye dayanımlı (IM) ve maximum dayanımlı (UHM) olarak üç grup olarak sınıflandırılır. Genel olarak filament çapları 5-8 μm'dir. Karbon fiber yüksek uzama ve çekme basma yönlerinde yüksek dayanım özelliği, korozyon, yorulma ve sürünme gibi özelliklere karşı yüksek direnç gösterirler. Ancak darbe dayanımları genel olarak cam ve aramid fiber takviyelerinden daha düşüktür.[24,25,26]

2.2.3.Polipropilen Fiberler

PP polimerleşme yeteneği sayesinde yaygın kullanılan bir termoplastik yapıdır. Genel olarak 3 farklı çeşitte türetilir. Çoğu propilen ham petrolün nafta ile buhar kırması ile monemerleşmesi sonucunda oluşur. Genellikle naftanın hedef ürünü etilen monomeridir.

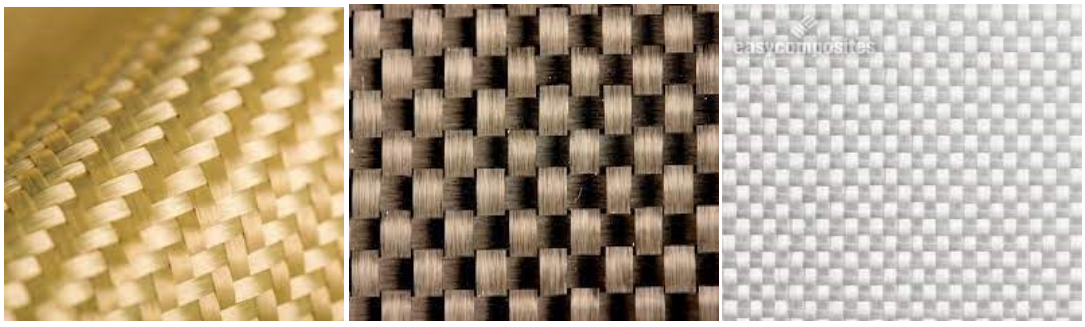
İkinci yöntem olarak rafineleşme proseslerinden monomerleşme elde etmektir. En son olarak günümüzde oldukça yaygınlaşan propan yapıların dehidrasyonu sayesinde propilen monomer oluşturmadır. Polipropilenin erime sıcaklığı diferansiyel kalorimetre tarama (DSC) cihazındaki aralığına göre değişir. Çoğu PP yapılar 171°C de erir. Tekrar eden polimerleşme ve kristal özelliklerine göre 130°C sıcaklığa kadar erime sıcaklıkları görülebilir. Polipropilen yanma önleme, boyutsal sabitlik ve sıcaklık dağıtımı gibi özellikleri ile yaygın bir şekilde kullanılır. Matris yapıda PP kompozit üretimde gösterdiği üstün karekteristik özellikler ile tercih edilmektedir. Polipropilen dolgu, takviye ve karıştırma kompenenti olarak iyi özellik göstermektedir. PP doğal sentetik polimerleşmede özgün özellikler sergilemektedir.[27]

METYX firma olarak PP ürünlerini kırpılmış elyaf türleri ile birleştirerek METYCORE ve METYCORE FS, METYCORE MAX ürünlerini üretmektedir. Birçok otomotiv ve yapısal parçada yüksek perdeleme, reçine akışı, geometrik uygulama (kalıp ve diğer modellere uygulanılabilirlik), ve yine yangın önleyici gibi mükemmel özelliklere sahiptir. [www.metyx.com]

2.3.Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kumaş Tipleri

2.3.1.Dokuma (Woven) Kumaş

Dokuma Kumaşlar karşılıklı geçişli çözgü (Warp) ve atkı (Weft) fiberlerin düz veya dalgalı stilde 0°/90° açılarda üretilmesidir. Teknik tekstil kumaşların bütünlüğü fiberlerin mekanik kilitlenmesine bağlıdır[28]. Perdeleme (Drape) kumaşların komplex kaliteli ve stabil kumaş üretilmesi öncelikle desen tipine bağlıdır. Alanca ağırlık, porozite (boşluk) gibi kumaş parametreleri fiberlerin texlerine ve fiber/alan oranlarına bağlıdır.[29]



Şekil 2.1 : Sırasıyla Aramid, Karbon, Cam Fiber Takviye kumaş örnekleri (Easy Composite 2022)

2.3.2. Düz (Plain) Dokuma Kumaş

Bu dokuma kumaş tipinde her çözgü her atkının altından eşit bir şekilde geçer. Plain dokuma kumaş simetrik, stabil ve porozite özellikleri uygundur. Ancak perdeleme (drape) ve yüksek seviyelerde kıvırma (crimp) özelikleri diğer dokuma kumaş tiplerine göre daha düşük mekanik özellikler gösterebilmektedir. Düz (plain) dokuma kumaş tipinde iplik yoğunlukları sınırlıdır. Birim alandaki kumaş kalınlığı ve kütlesi sınırlıdır. Basit kumaş türüne göre daha güçlü tekstil özellikleri gösterir. Plain dokuma kumaş tipinin tercih edilme sebebleri arasında çözgü iplikleri arasında diferansiyel gerginlik ve kumaş üretiminde çeşitli iplik kullanımı sağlamaktır. [29]

2.3.3.Dalgalı (Twill) Dokuma Kumaş

Bir ya da birden fazla çözgü ipi düzenli olarak iki veya daha fazla atkı düzeninde tekrarlanır. Fiber yapıları sentetik polimer yapı olabileceği gibi doğal fiber keten, şaşal, kenevir gibi yapılar olabilir.[30] Twill kumaşların ilmek yapısı düzenli ve diaognaldir. Plain tipi ile incelendiğinde ıslanma ve perdeleme farkları çok gözlenmez. Azaltılmış kıvırma özelliği ile twill tipi dokuma kumaş daha yumuşak ve stabil yüzeye ve nispeten yüksek mekanik özelliklere sahiptir.[29] Bu bağlamda, bu çalışmada kullanılan kumaş fiber çeşitleri Tablo 2.1 de gösterilmiştir.

GW211T E GLASS 2X2 TWILL W-120CM
CW245 F-C PLAIN W 3K-50-1000MM
GW275P E GLASS 2X2 TWILL W-120CM
CW245 F-C 2X2 TWILL 3K-50-1000MM
PP 250 gr/m^2 mat

Tablo 2.1 : Çalışmada Kullanılan Fiber Takviye elemanları

2.4. Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris – Epoksi Reçine

Epoksi reçine diğer reçine tiplerine göre yüksek mekanik özellik, çevresel bozulmalara karşı direnç,tabakalı üretimlerde yapışkanlık ve yüksek dispers faz geçişleri sayesinde sık kullanılan bir matris türüdür. Epoksi adını tek oksijen atomunun 2 karbon atomu ile bağlanmasundan alır. Epoksi reçine genelde rengi amber, lacivert ve kahverengi olarak diğer

reçinelerden ayırt edilebilir. Sertleştiricileri düşük viskoz değerlerine sahiptir ve kolayca uygulanabilir. Kürleşme sıcakları 5°C~150°C arasında değişir. Önemli avantajlarından birisi büzülme oranın düşük olması ile takviye elemanın mekanik özelliklerini düşük farklılık oranları ile yansıtabilmesidir. Yüksek yapıştırıcılık oranları, yüksek mekanik özellikler ve yüksek elektrik sönümleme ve iyi kimyasal özellikler epoksi reçineyi tanımlar. Epoksi reçine uzun kimyasal zincirlerini ester dimerleşmesi yerine CH_2-CH-O (Etilen Oksit) ile sağlar. Ester gruplarındaki su absorbisyonu problemi doğal olarak epoksi sistemlerde daha azdır. Merkezde bulunan iki zincir grubu sayesinde lineer gruplardan daha iyi termal ve mekanik özellik gösterirler. Epoksiler polyester reçinelerden farklı olarak 'sertleştirici' ile kürleşme işlemini gerçekleştirirler. Sertleştiriciler epoksi sistemlere 'amine' grubunu sağlarlar iki epoksi grubu bir amine grubu ile birleşir. Ve bu birleşme kompleks üç boyutlu zincirlenmeyi meydana getirir.[104] Çalışmada 'HEXİON EPIKOTE™ Resin MGS RIMR 135' adlı reçine ve aynı firmanın ürettiği 'HEXİON EPIKURE™ Curing Agent MGS BPH 137 GF' sertleştirici şirketin belirlediği teknik kağıt tds %30 olacak şekilde uygulanarak kullanılmıştır.

Özellikler	İnfüzyon Reçine RIM 135	Sertleştirici RIMH137
Yoğunluk [g/cm^3]	1,13-1,17	0,93-0,98
Viskozite[mPas]	700-1100	10-50
Epoksi Denklik [g/equivalent]	166-185	
Epoksi Değeri [equivalent/100g]	0,54-060	
Geri dönüşüm Indeksi	1,548-1,552	1,460-1,463
Eğilme Dayanımı [MPa]	90-120	
Çekme Dayanımı [MPa]	60-75	
Elastisite Modülü [GPa]	2,7-3,2	
Kopma Uzaması [%]	8-16	

Tablo 2.2 : Çalışmada Kullanılan Reçine ve Sertleştirici Teknik Kağıt Özellikleri (TDS)

2.5. VARTM ile Kompozit Malzeme Üretilmesi

2.5.1.VARTM Formulasyonu

Vakum yardımcılı reçine transfer yöntemi temelde fiber serim yönlerindeki reçine akışı ve fiber takviyelerinin stabil ve her noktada aynı özellikler göstererek kürleşmesini

sağlamaktır.[31] Reçine kürleşme kinematiği ve viskozite reçine emdirilmeden önce dikkate alınmalıdır.Sonuç olarak VARTM simülasyonu reçinenin akışı ve kürleşmesi,stabil fiber dağılımı,kürelşme kinematiği ve visokiziteye bağıldır [32]

2.5.2. Akışkan Modeli

VARTM yönteminde akışkan modeli süreklilik denkleminden açıklanarak reçinenin yüksek geçirgenlik durumunda nasıl davranış gösericeğini tanımlar.

$$\nabla_U = 0 \qquad [2.1]$$

Boşluklu yapılarda Darcy's eşitlik denklemi

$$u = (-K/\mu)* \nabla p \qquad [2.2]$$

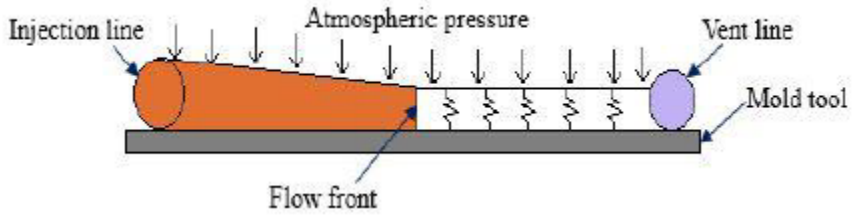
u =akışkanın hızını , K ve p geçirgenlik ve μ ise basınç gradyenlerini temsil eder.

2.5.3 Fiberlerin İnfüzyon Sıkıştırılması

VARTM yönteminde vakum poşeti sıkıştırma basıncının oluşmasını sağlar (Şekil 2.2). Bu modelleme de vakumlama değişik varyanslarla kalıp yüzeyi referansı ile giriş çıkış noktalarından verilir. Vakum poşetinin esnekliği tabakalı fiber üretim prosesinde bir çok çeşitli parametreye bağılıdır. [80] Fiberlerin infüzyon altındaki sıkıştırılması

$$P_{atm}=P_{comp}+P_{resin} \qquad [2.3]$$

P_{atm} kalıplama dış ortam atmosferik basıncını P_{com} kalıplama basıncını P_{resin} reçine basıncını temsil eder.



Şekil 2.2 : Fiberlerin basınç altında kürleşme kinematiği

2.6. Üretim Hazırlık Aşaması

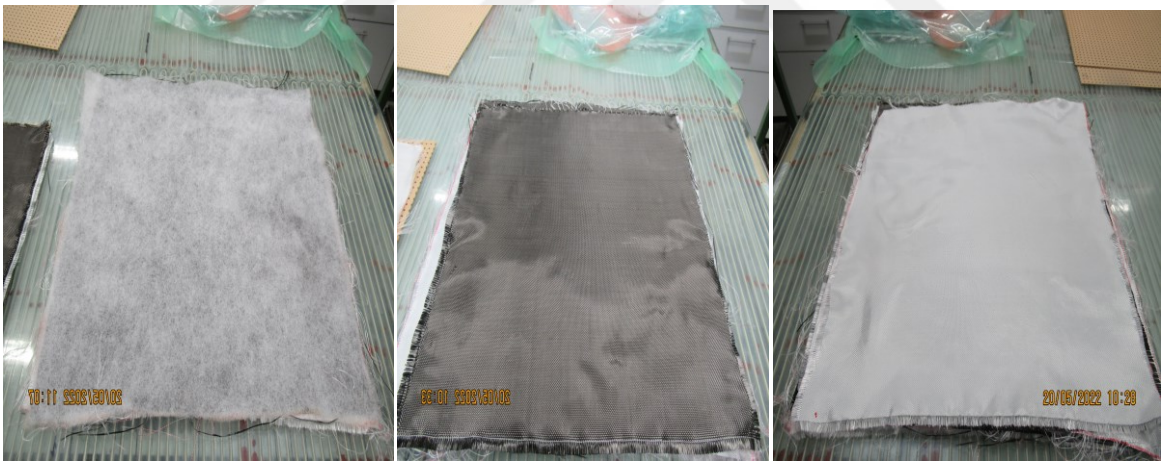
Seçilen fiber takviye elemanlarının kat istif dizilimi, uygulanacak sarf malzemelerin seçimi VARTM yönteminde yapılan son gelişmeler ve standartlarda belirtilen formulasyonlarla deney setleri oluşturulmuştur. Deney setlerinde kullanılan dokuma (woven) kumaşların fiber yönlerdirmeler 0° olarak alınmıştır. Katlar arasında simetrinin sağlanması için PP kumaş

merkezde olacak şekilde 5L ve 9L, plain weave, twill kumaş desen farklılıklarını incelemek açısından 2x2 4 set oluşturulmuştur. Setlerin istifleme,içerik tablosu Tablo 2.3'te belirtilmiştir.

Adlandırma	İstifleme	Boyut	Kat Sayısı
TW (Type 1)	C/K/C/K/PP/K/C/K/C	60X60 cm	9L
TW (Type 2)	C/K/PP/K/C	60X60 cm	5L
PW (Type 3)	C/K/C/K/PP/K/C/K/C	60X60 cm	9L
PW (Type 4)	C/K/PP/K/C	60X60 cm	5L

Tablo 2.3 : Tez Çalışması Laminant İstifleme Planı

Tablo 2.3'te belirtilen kumaş katsayı ve boyuttaki takviyeler Şekil 2.3'de görüldüğü gibi istiflenecek hale getirilmiştir.



Şekil 2.3 : Takviye elemanlarının kesimi 60x60 cm

2.6.2.VARTM Sarf Malzemeleri

VARTM yönteminde sarf malzemeler işlem sonrasında kalıptan parçanın kolay çıkarılması ve reçinenin kolay akışının sağlanması için işlem sırasında istiflemede ve sistemin tamamlanmasında kullanır. Bazıları ise geri dönüştürülmez.

Vakum Filmi (Realising film): İnfüzyon basınç ortamının oluşmasını sağlar.Depolama koşulları hassastır.Kalıp tasarımda tensör özelliklerine dikkat edilmelidir.

Vakum Macunu (Sealant Tape): Kalıp üzerinin sınır bölgelerine uygulanarak vakum poşeti ile kalıp arasında sızdırmazlık sağlayan malzemedir.Çeşitli uygulamalar için sıcaklık,basınç gibi faktörler gözetilerek seçimi yapılır.

Akış filesi (Release Film): İnfüzyon sürecinde reçinenin ilerlemesini sağlamak için fiber takviye dizilimi tamamlandıktan sonra uygulanır.

Soyma Kumaşı (Peel Ply): Kompozit parçanın numune haline getirilmesi ve farklı kompenentler arasında yüzey sürtünme sağlaması için laminat üzeründe elle gözlemlenebilecek pürüzülü yüzey oluşmasınısağlayan yardımcı bir kumaştır.Fiber takiye sonrasında ve öncesinde uygulanarak artık sarf malzemenin kolayca sökülmesini sağlar.

Spiral Hortum:İnfüzyon sürecinde reçinenin kalıp sistemine ulaşmasını sağlar.

Baskı Plakası (Masonite Plate):Çok katmanlı tabakalı infüzyon proseslerinde veya presleme ihtiyacının olduğu infüzyon yöntemlerinde kullanılır.Mukavva malzemesinin reçine uyumlu hale getirilmesi sonucu oluşur.

Aseton: Kalıbın temizlenmesinde kullanılır.

Kalıp Ayırıcı : İnfüzyon sonrasında kalıptan ayrılmayı sağlar.

Tablo 2.4'te kullanılan sarf malzemelerin boyutları ve uygulanma sırası belirtilmiştir. Kalıp çalışma alanı sarf malzemenin en fazla alan oluşturulan elemanına göre hesaplanmıştır.

Sarf Malzeme Adı	Boyut (cm)	Uygulanma Sırası
Kalıp Ayırıcı-Aseton	Sıvı	1
İnfüzyon Macunu	80x110cm	1
Takviye Malzemeleri	60x60 cm	2
Soyma Kumaşı	60x80 cm	3
Performe Film	60x65 cm	4
Baskı Plakası 60x60	60x60 cm	5
Akış Filesi 55x59 cm	55x59 cm	6
Vakum poşeti (Kulak dahil)	80x110cm	7
Kalıp Çalışma Alanı (KÇA)	80x110 cm	

Tablo 2.4 : Sarf Malzemeleri ve Özellikleri

2.6.3.VARTM Basınç Hattı Elemanları

VARTM basınç hattı oluşturmak için kullanılan ve işlem bittikten sonra tekrar kullanıbilen geri dönüş tankı, hortumların birbirine bağlanmasını sağlayan vana ve T bağlantıları, ve yine vakum pompası gibi elemanlar bulunur.

Basınç Hat Elemanı	Özellik
Spiral hortum	12 Ø
Cidarlı vakum kaçrıma tankı	175 Ø
T bağlantıları	8 Ø
Vakum Pompa	1.5 Kw

Tablo 2.5 : Basınç Hattı Elemanları

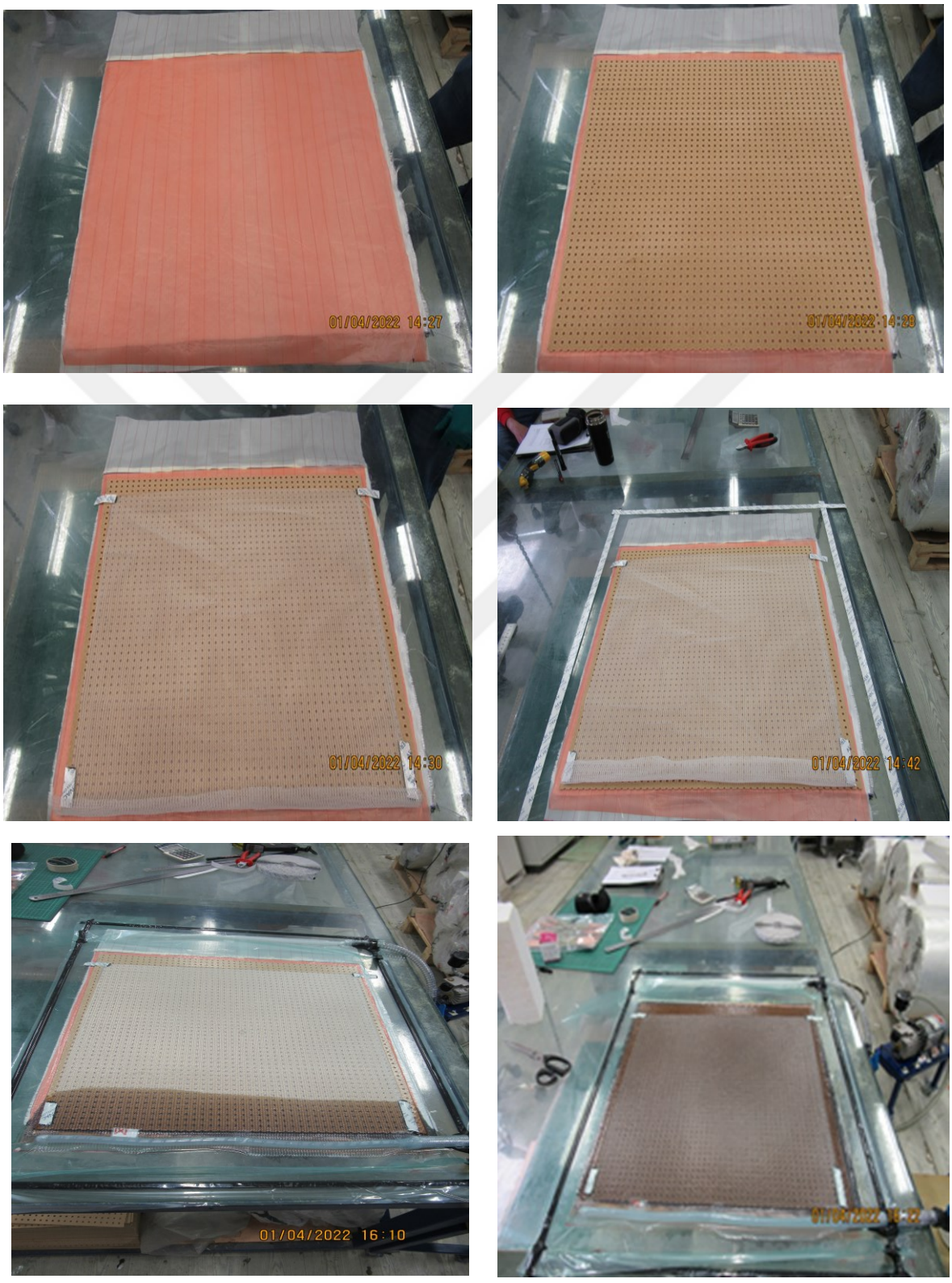


Şekil 2.4 : Vakum Sırasında Kullanılan Geri Dönüş Tankı ve Pompa Spiral boru bağlantısı

2.6.4. Hazırlık Aşamasının Tamamlanması ve Üretimin Gerçekleştirilmesi

Tüm hazırlanan sarf malzemeleri kalıp ayırcı uygulanmış cam kalıp üzerine tablo 2.4 te belirtilen sıra ile dizilir. Vakum filmi uygulandıktan sonra vakum macun ile vakum filmi arasında hava kaçağı olup olmadığı kontol edilir.Kaçak testi yapılan VARTM setlerine reçine emdirilme işlemi uygulanır. Reçine 100Mbar (-900 Mbar) basınç ile emdirilmiştir. Şekil 2.5te sıralama ve uygulama belirtilmiştir. Reçine emdirilmesi tamamlanan proses vakum hattı kapatılarak oda sıcaklığında 1 gün kürleşmeye bırakılır. Kürleşme süresi reçine sağlayacısının teknik verilerinden alınmıştır. Kürleşmesi tamamlanan plakaların önce basınç hat elemanları daha sonra ise sarf malzemeleri kontamine atık kısımlarına ayrılarak çıkartılır.Ardından plakanın kalıbın şeklini alıp almadığı veya düzlemselliği su terazisi ile

kontrol edilir. Plaka kalınlıkları komparatör yardımı ile ölçülmüştür. Şekil 2.6 da plaka kalınlık ve düzlemsellik kontrolüne ait resimler gösterilmiştir..



Şekil 2.5 : Sarf malzemeler kalıp yatırma ve reçine emdirilmesi



Şekil 2.6 : Plaka kalınlık ve Düzlemsellik kontrolü

Üretimi tamamlanan plakaların kalınlıkları Tablo 2.6'da gösterilmiştir.Sonrasında gerekli etüv ve kesim aparatları ile standartlara uygun kesim ve etüv işlemleri yapılır.

Plaka Adlandırma	Plaka Kalınlık
Tip 1	3,12 mm
Tip 2	2,92mm
Tip 3	3,19mm
Tip 4	2,95 mm

Tablo 2.6 : Plaka kalınlıkları

2.7. Mekanik Özellik Testleri ve Ekipmanları

Testlerin seçilen standartlara uygun ve düzgün numune haline getirilmesi için cihaz ve aletler kullanılmıştır. Numunelerin kesilmesi için kesme makinesi (cnc router), laminatlarda postkür işlemi için etüv, elyaf oranlarının tayini için kül yakma fırını ,oluşturulan numunelerin ölçümü için kumpas ve miktrometre kullanılmıştır. Yoğunluk ölçümü için hassas terazi, kumaş ve reçine ağırlıklarının ölçümü için terazi, mekanik özelliklerin karekterizasyonu için universal test cihazları kullanılmıştır.

Kesim Makinesi(CNC Router): Kürleşmesi tamamlanan plakaların belirli noktalarından 3 Nokta Eğme, Çekme ve ILSS testleri için numuneler kesilmiştir. Numunenin yan taraflarında mikroseviyede çatlak oluşmasını engelleyen cnc router kesici ile numuneler kesilmiştir.



Şekil 2.7 : Universal Test Cihazları ve Eksenel Transverse Extansometre (ClipOn) ile Ölçüm

Universal Test Cihazları: Mekanik testler için Şekil 2.7'de şeklinde görülen Shimadzu AG-X 250 KN kapasitesinde test cihazları kullanılmıştır.Cihazla birlikte ölçümleri algılamak ve ilgili ayarları efektif ham ve metod veri şeklinde alabilmek için TrapeziumX programı ve Epsilon marka axial ve transverse extansometre kullanılmıştır. Bu program ve testler ile mekanik sonuçlar elde edilmiştir.

Etüv : Numunelerin dispers faz birleşimini tamamlamak için Nüve markasının FN400 model laboratuvar tipi etüv makinesi 80 °C de 3 saate kadar çıkan bir sürede postkür işlemi uygulanmıştır.

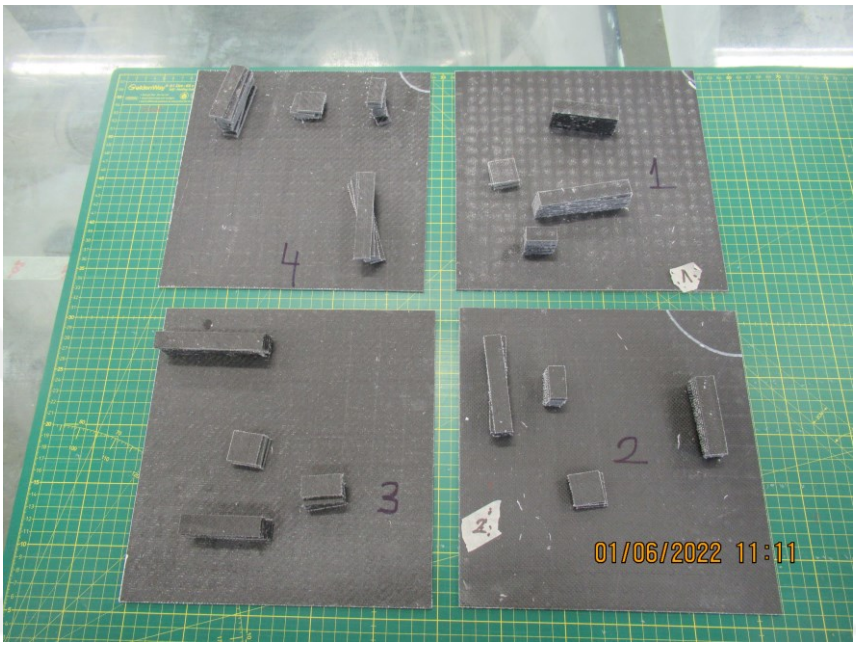
Kül Yakma Fırını : Elyaf oranı testi için refrakter malzemeli 1200°c ye kadar çıkabilen Protherm markasının PLF115M modeli kullanılmıştır.

Analitik Terazi : Üretilen hibrit kompozit malzemelerin alansal yoğunluk ve normal yoğunluk (Tablo 2.7) değerini bulmak için Mettler Tolede firmasının XS105DualRange modeli kullanılarak yoğunluklar bulunmuştur.

Plaka Adlandırma	Plaka Yoğunluk[g/cm^3]
Tip 1	1,2911
Tip 2	1.302
Tip 3	1.295
Tip 4	1.301

Tablo 2.7 : Plaka Yoğunlukları

Hassas Ölçüm : Kesim işlemi bittikten sonra (Şekil 2.8), ölçümler genişlik ve kalınlık olarak çekme, 3 nokta eğme, ILSS testleri için her test numunesinin 3 farklı noktasından alınmıştır. Genişlik için Mitutoyo marka dijital kumpas ve aynı markanın mikrometre ölçeri ile ölçüm öncesinde gerekli kalibrasyon kontrolleri yapılarak ölçüm alınmıştır.



Şekil 2.8 : Kesim işlemleri bitmiş test numuneleri

2.7.1.Çekme Testi (Tensile Test)

Dört farklı hibrit kompozit plakaların çekme test numunelerinin hazırlanması ve test uygulamaları için 'ASTM-3039/D 3039 M-08 standart yönelgesi takip edilmiştir. Kumaşlar dokuma ve yönlerdirme olmayan kumaşlar olduğu için test numuneleri reçine veriliş yönü ve çekme test yönü 0° olacak şekilde ayarlanmıştır. Standartlara uygun olarak kesilen numunelere tableme işlemi uygulanmıştır. Test öncesi gerekli extensometre, test cihazı ve program kalibrasyonları yapılmıştır. Uygulama test hızı 2 mm/min ve çekme dayanımı 2.4 numaralı formulle hesaplanmaktadır.

$$F^{tu} = P^{max}/A \quad [2.4]$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad [2.5]$$

F^{tu} : Maximum çekme dayanımı [MPa]

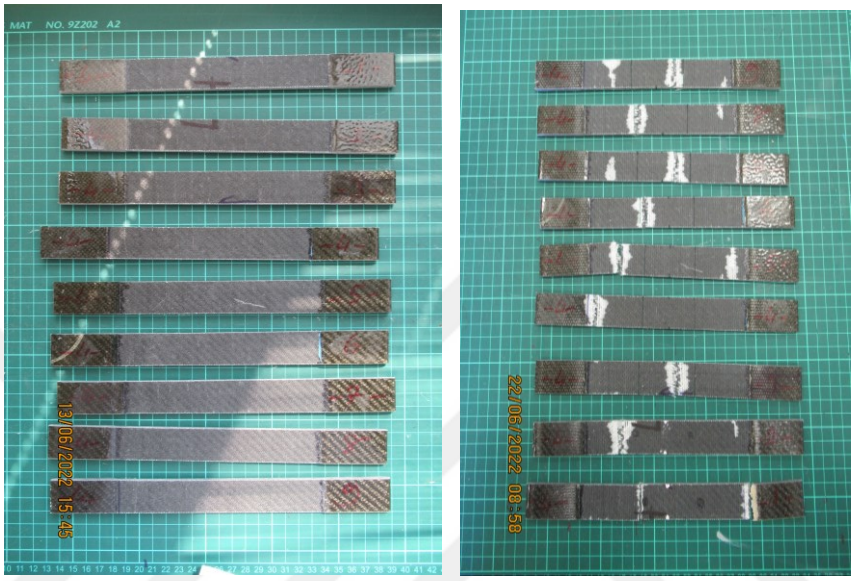
P^{max} : Maximum kuvvet [N]

σ_i : Data noktası dayanım [MPa]

P_i :Data noktası kuvvet [N]

A : Ortalama Kesit alanı [m^2]

Çekme testinde ekstansiyometre ile chord değeri %0,05 - %0,25 uzama değerleri aralığında ve lineer bölgede olacak şekilde elastik modul değerleri hesaplanmıştır. Poisson değeri için traverse – axial extansiyometreler kullanılmıştır. Şekil 2.9'da test öncesi ve test sonrası numeneler ait resimler gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Test öncesi ve sonrası çekme test numeneleri

2.7.2. Üç Nokta Eğme Testi (Flexural Test)

Üretilen dört farklı tip kompozit plakaların eğme özelliklerinin tayini için EN ISO 14125 standartı uygulanmıştır. Test numuneleri kalınlık ve malzemeye göre sınıf III deney malzemesi sınıfında olan numuneledir (Mesnet/Kalınlık 20:1), (Uzunluk/Kalınlık 30:1), (Mesnet/Uzunluk 1,5.1) ve eni 15 mm sabit ölçülerinde olup, üç nokta eğme testine tabi tutulmuşlardır. Şekil 2.10 da numaralı şekilde test öncesi ve test sonrası numuneler gösterilmiştir.

$$\sigma f = \frac{3.F.L}{2.b.h\text{^}2} \qquad [2.6]$$

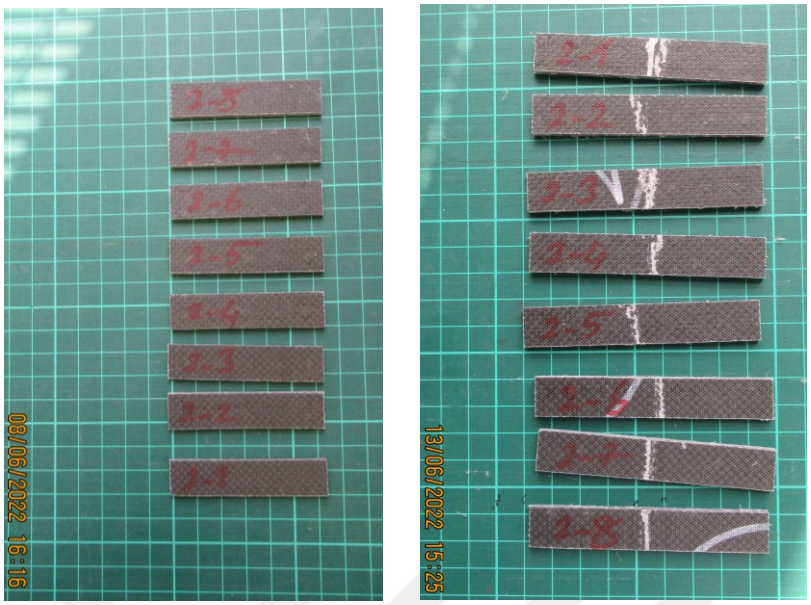
σ_f = Eğme dayanımı, [MPa]

F = Maksimum eğme kuvveti, [N]

L = Alt destekler arası mesafe, [mm]

b = Numune genişliği, [mm]

h = Numune kalınlığı, [mm]



Şekil 2.10 : Test öncesi ve sonrası 3 Nokta Eğme test numuneleri

2.7.3.Tabakalar Arası Kayma Testi (ILSS)

Tabakalar arası kayma testi (Inter Laminar Shear Stress) kısa kiriş metodu ile ASTM D 2344 / D 2344 M -16 test standartına uygun olarak gerçekleştrilmiştir. ILSS Testleri, Üç Nokta Eğme testine göre farklı oranlarda uygulama sağlayarak takviye matris ilişkisine dair veri elde edilmesini sağlar. Fikstür kurulumunda ve numune kesiminde standartta belirtlien (En/Kalınlık 2:1), (Uzunluk/Kalınlık 6:1), (Mesnet/Kalınlık 4:1) oranları uygulanmıştır. Standarta uygun olarak test 1mm/dk hızda tamamlanmştır.Tamamlanan test verilerine göre standarta uygun olan formüle göre tabakalar arası dayanım hesaplanır. Şekil 2.11'de test öncesi ve test sonrası görüntüler verilmiştir.

$$\tau = \frac{3.F}{4.b.h} \qquad [2.7]$$

τ = Görünür tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS), [MPa]

F = Maksimum kuvvet, [N]

b = Numune genişliği, [mm]

h = Numune kalınlığı, [mm]

2.7.4. Elyaf Oranı Tayini

Temel hesap çıktıları için gerekli olan ağırlıkça ve hacimce elyaf oranlarını bulmak için ISO 1172 standarlarına göre yakma deneyi (kalsinasyon işlemi) yapılmıştır. Bu işleme göre 2,5x2,5 luk kare bloklar halinde kül yakma fırınında 450 °C de 3 saat ısıtma prosesine tabi

tutulmuştur. Bu işlem için gerekli ağırlık hesaplamaları hassas terazide ölçülerek not edilmiştir. Standarta belirtilen formulasyona göre ağırlıkça elyaf oranı x.x denklemine göre bulunmuştur.

$$Wf = 100\frac{m3-m2}{m2-m1} \quad [2.8]$$

Wf =Ağırlıkça elyaf oranı, %

m_1 = Kroze ağırlığı, gr

m_2 = Numune kompozit parça ve kroze ağırlığı, gr

m_3 = Kalsinasyon sonrası kroze ve kalıntının ağırlığı, gr

hacimce elyaf oranı standartta verilen aşağıdaki formule göre tayin edilir.

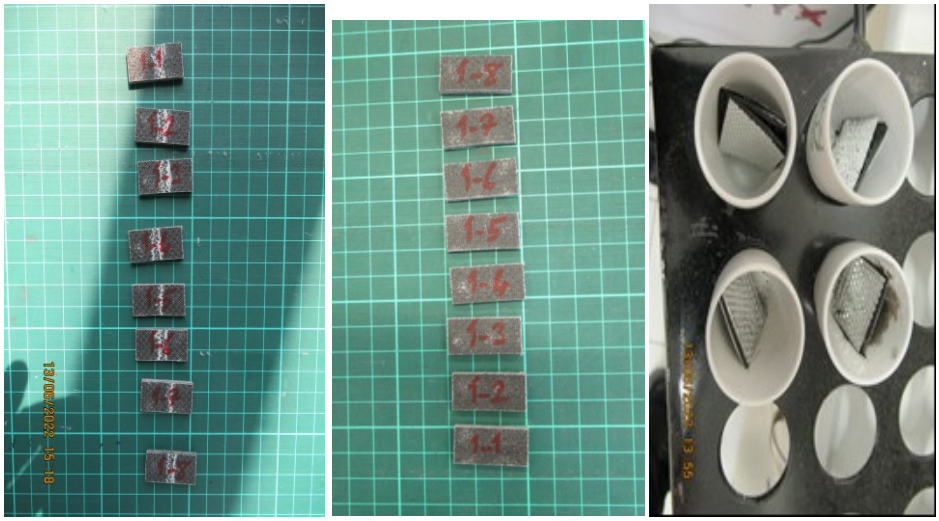
$$Vf = \frac{\left(\frac{Wf/}{\rho f}\right)}{\left(\frac{Wf/}{\rho f}\right)-\left(\frac{Wm/}{\rho m}\right)} \quad [2.9]$$

V_f = Hacimce elyaf oranı % **W_f** = Ağırlıkça elyaf oranı, %

ρ_f = Elyaf yoğunluğu, g/cm³

ρ_m = Matris yoğunluğu, g/cm³

Şekil 2.11'de kroze içindeki yakma sonrası numune görüntüleri verilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 2.11 : Yakma deney numune resimleri

(a) ILSS test sonrası, (b) ILSS test öncesi, (c) Kalsinasyon sonrası kroze numune

Toplamda 4 adet plaka üretilmiştir.Bu plakalardan standardinasyon ve özelliklerin tayini için en az 4 tane olmak üzere 100'den fazla test numunesi çıkarılmıştır. Üretim ve test esnasında gerekli iş sağlığı güvenliği yönetmeliğine ve kontamine atık prosedürlerine uyulmuştur.

2.8. Klasik Laminasyon Teorisi (CLT)

Klasik laminasyon teorisi genel olarak birden fazla katmanlı yapılarda kat dizilimi, istifleme ve malzeme özelliklerine dayalı olarak teorik tahmin matris takımı olarak kullanılan bir teoridir. Bu teori elastik ve eğilme özelliklerinin tahminini sağlamaya çalışır. Karışım kuralından daha doğru sonuçlar verir. İstifleme oryantasyonu ve her kat için farklı malzeme özellikleri stress uzama grafiği altında matris denklemleri şeklinde oluşturulur.[33] Katman yüklemelerinde kayma ve eksenel yükleme altında, eğilme ve burulma momentleri oluşabilir. Bu bağlamda, klasik lamine teorisi bu ilişkileri geliştirmek için kullanılılr. Klasik laminasyon teorisindeki tüm bu ilişkileri ağı bunu açıklar.[81] Orta düzlemdeki şekil değiştirmeler-eğriliklerle alakalı kuvvet ve moment bileşenleri denklem 2.10'da gösterilmiştir.[34]

$$\begin{bmatrix} Nx \\ Ny \\ Nxy \\ Mx \\ My \\ Mxy \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Nx^T \\ Ny^T \\ Nxy^T \\ Mx^T \\ My^T \\ My^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Nx^m \\ Ny^m \\ Nxy^m \\ Mx^m \\ My^m \\ My^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^\circ \\ \varepsilon_y^\circ \\ \gamma_x^\circ \\ K_X \\ K_Y \\ K_{XY} \end{bmatrix} \quad [2.10]$$

Denklemde;

Nx Ny Nxy ; Düzlem içi kuvvetler

Nx^T Ny^T Nxy^T: Düzlem içi termal kuvvetler

Nx^m Ny^m Nxy^m : Düzlem içi nem kuvvetler

Mx My Mxy ; Uygulanan kuvvet ve momentler

Mx^T My^T Mxy^T;Termal kuvvet ve momentler

Mx^m My^m Mxy^m; Nem kuvvet ve momentler

$A_{1\text{-}2\text{-}6}$: Düzlem içi yönlendirmeden bağımsız sıkışıklık matrisi

$B_{1\text{-}2\text{-}6}$: Düzlem içi yönledirmeye bağımlı eşleşme sıkışıklık matrisi

$D_{1\text{-}2\text{-}6}$: Düzlem içi Eğilme Matrisi

$\boldsymbol{\varepsilon_x^\circ}$ $\boldsymbol{\varepsilon_y^\circ}$ $\boldsymbol{\gamma_x^\circ}$: Uzama

$\boldsymbol{K_X}$ $\boldsymbol{K_Y}$ $\boldsymbol{K_{XY}}$:Eğrilik çıkış değeri [34]

Kompozit laminasyon teorisi uygulanan kuvvet, moment, termal ve nem etkileri ve plaka eğilme durumlarını inceler. Oluşturulan laminantların arasında kayma olmadığını ve mükemmel dizilim sağladığını kabul eder. Matrisin ana bileşenleri A, B, D matrisleri tabakalaşmayı açıklar ve buna göre istifleme düzeni ve mekanik değerler hakkında fikir verir.[33,34]

2.8.1.Uzama, Eğilme, Birleştirme Matrisleri

Gerinme Uzama Matrisi (A;Strecthing Stiffness Matrix)

A matrisi gerinme durumundaki uzamayı ve kuvvet altında düşük uzamayı ifade eder, bu durum onu istiflemeden bağımsız kılar. Ve yine, A tabakaların kalınlığına bağlıdır. [35]

$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^{n} [Q_K^-](h_k - h_{k-1}) \qquad [2.11]$$

Kaplin Uzama Matrisi (B;Coupling Stifness Matrix)

Moment durumunda uzamayı ifade eder.Yükleme durumunda B matrislerinin sonucu 0'dan farklı çıkıyorsa oluşacak plakada eğriler meydana gelecek demektir. Bu yüzden tasarımda B matrisi olabildiğince 0'a yakın olmalıdır. İzotropik kabul durumunda B matrisi 0 yakın oluşturulmalıdır.[35]

$$B_{i,j} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} [Q_K^-](h_k^2 - h_{k-1}^2) \qquad [2.12]$$

Eğilme Uzama Matrisleri (D;Bending Stiffness Matrix)

Transverse yükleri ve eğilme moment yüklerinin ifade eder. Eğer D matris değerleri büyük çıkarsa toplam deformasyon değerleri düşük çıkacaktır.[35]

$$D_{i,j} = \sum_{k=1}^{n} [Q_K^-](h_k^3 - h_{k-1}^3) \qquad [2.13]$$

CLT matris çıktılarının birden fazla çözüm yolu bulunsada sonlu elemanlar yöntemi ve bu yöntemden türetilen program kitleri iteratif sonuçları vermektedir. CLT çıktılarından türetilen hasar teorileri karşılaştırmalı olarak tabakalı hibrit, nonhibrit kompozitlerde kullanılmaktadır.

2.9.Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi numerik diferansiyel denklemleri, matris denklemlerinin çözümlemelerinde oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Temel yapısal analiz, ısı, akış, kütle transferleri, elektromagnetik ve kompozit analizlerinde sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmaktadır.[36] Sonlu Elemenalar Analizi problemi çözmek için sınır şartlarını referans kabul ederek, büyük sistemleri 'sonlu eleman' (node) dediğimiz küçük sistemlere böler. Parça üzerinde ayrıklaşmış uzay alanları elde etmeyi sağlayan 'mesh' ile belirli sayıda node elemanı belirlenmiş hale gelir. Sonlu elemanlar analizi, sınır şartları ve çözümleme noktaları bilinen problemi cebirsel denklemlerle çözümlemeye çalışır.[37] Yöntem hata katsayıları ile çözümlemeleri optimize eder ve kendi içinde düzenli, parçalı, diferansiyel, sürtünmeli, lineer, lineer olmayan (non-linear) olarak ayrılmaktadır. [38,39]

2.10.Temsili Temel Hacim Yöntemi (Representive Elementary Volume, RVE)

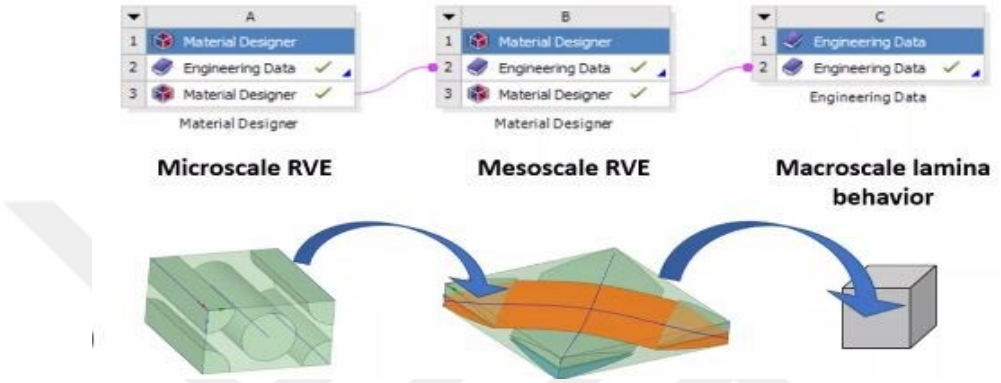
Temsili hacim yöntemi kompozit malzemelerde boşluklu yapıları hücresel (unit cell) biçimde ölçümlemeyi ve bütünün temsili değerini ölçer.Periyodik malzemelerde tanımlamalar karmaşıktır. RVE (Şekil 2.12) elastik modul, hidrojeolojik özellikler (su tutma (absorbisyon)), elektromagnetik özellikler ve termal özellikler olmak üzere birçok farklı fiziksel özellikler üzerine çalışır. Rodney Hill RVE tanımını heterojen malzemeler için;

1.Genel olarak ortalama karışımın değerlerini içerir.

2.Makroskopik düzlemsellik için görünür özelliklerin yüzey değerlerinden bağımsız olması gerekir şeklinde tanımlamıştır. Özünde RVE, uygulanan sınır koşullarına göre etkin yapısal tepkinin bağımsızlığına ilişkin bir bildiridir.[40] Drugan ve Will tarafından yapılan RVE tanımına göre ise;

1.Uzamsal sabitleri (modül) ortalama yapısal yanıt olarak temsil etmek için oluşturulmuş kompozit malzemenin en küçük yapı elemanıdır. RVE heterojen bir malzemeyi homojen bir malzeme ile değiştirmenin mümkün olduğunu varsayar. Bu varsayım, hacmi var olmayan makroskopik özellikler sunmadan mikro yapıyı temsil edecek kadar büyük olması gerektiğini ima eder. Öte yandan numune analitik ve sayısal olarak analiz edilebilecek kadar küçük hale getirilebilmelidir.[41] Homojenizasyonun ilk adımı RVE'nin modellenmesidir.

Kompozit malzemelerin sertliğini hesaplamak için RVE seçilir. Bloke edilmiş ağlar (mesh) oluşturulur ve periyodik sınır koşulu varsayılan olarak kullanılır (ANSYS). Ağın periyodik olmaması durumunda mekanik özellikleri hesaplamak için periyodik olmayan sınır koşulları uygulanabilir. Son olarak, RVE maruz birkaç yük durumunu tanımlar, homojenleştirilmiş malzeme verileri buna göre hesaplanır.[42]



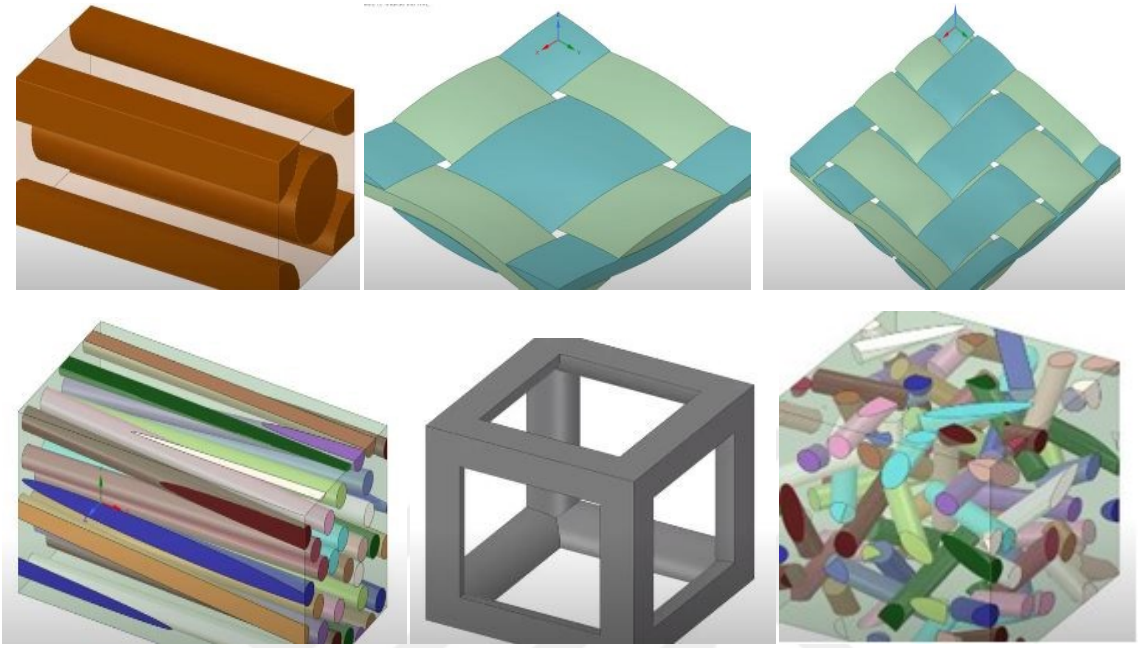
Şekil 2.12 : RVE Material Designer Aşamaları [43]

2.11.ANSYS Material Designer

Mühendislik biliminde kompozit malzemlerin mikro yapılarını yakalaması ve modellemesi oldukça zor bir iştir. Mikroyapının tüm ayrıntılarını güvenilir bir şekilde hesaplamak zorunda kalınsaydı, bir sonlu eleman simülasyonunu çalıştırmak için gereken hesaplama yükü mevcut hesaplama yeteneklerinden çok uzak perspektifte kalırdı.[42] Topoloji açısından optimize edilmiş geometriye yönelik eğilim göz önüne alındığında, simülasyonların hesap yükü aşırı artacaktır. Bu karmaşık geometriler ayrıca karmaşık mikro yapılara sahipse, bunları simule etmenin yolu malzeme özelliklerini homojenleştirmektir. Material Designer ile RVE'leri özel ve önceden tanımlanmış geometri türlerine göre analiz edilebilebilir. Material Designer da bulunan önceden tanımlanmış mikro yapılardan bazıları şunlardır (Şekil 2.13).

- Tek Yönlü Lif
- Dokuma Elyaf
- Doğranmış,Kırpılmış Elyaf
- Uzun Düzenli Lifler
- Uzun Rastgele Lifler

Bunun dışında farklı kafes yapıları tasarımları RVE method ve material designer ile mümkündür.[43]

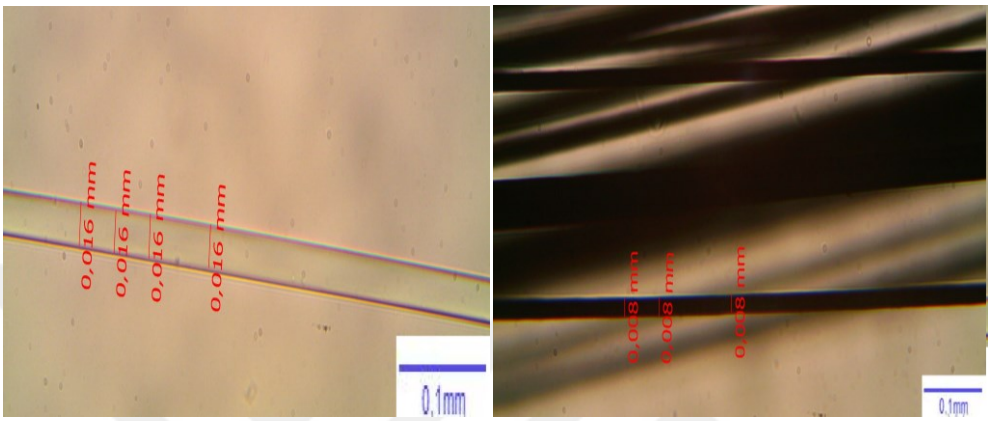


Şekil 2.13 : Sırasıyla Tek yönlü, Plain, Twill, Karışık, Kubik ve Rastgele Latex yapıların şematik gösterimi (ANSYS Material Designer 2022)

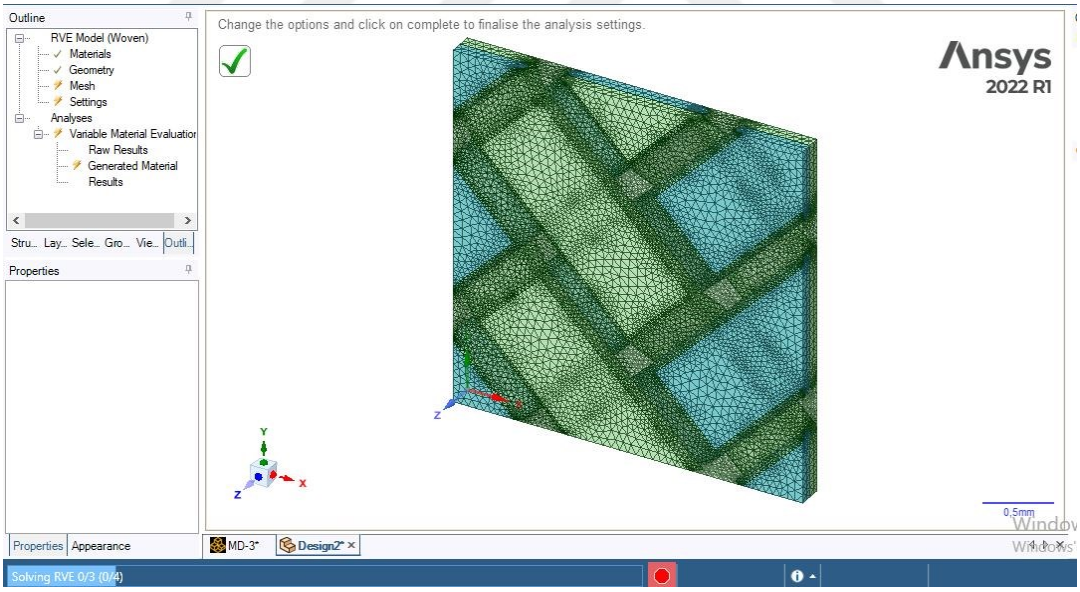
2.11.Temsili Temel Hacim (RVE) Modelleme ve Tasarımı

Çalışmada yapılan deney setlerine referans olması, karşılaştırmalı değerler elde etmek ve mikro-meso-makro ölçülerinde homojenleştirme işleminde hibrit etkisini nasıl göstereceğine dair öntasarım fikirleri elde etmek amacı Ansys Inc. tarafından sağlanan malzeme seçim katoloğundan karbon, cam ve polipropilen takviye malzemeler seçilerek homojenleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Setlerde oluşturulan 4 tip için ortak referans değeri ve twill temsili temel hacim modelleme yapılmıştır. Cam, karbon takviye yapıların teknik kağıt verilerinin kontrolü ve filament çaplarını öğrenmek için mikroskop altında kumaş görüntülerine bakılmıştır (Şekil 2.14). 0,1mm (100x) optik yakınlaştırma oranında cam için 16 μ_m karbon için 8μ_m fiber çapı ölçülmüştür. Fiber ve iplik oranları mikro-meso ve makro homojenleştirmede birbirini takip edecek seviyede oluşturmuştur. RVE modeli her takviye elemanı için ayrı çıktıları başarı ile gerçekleştirerek ön tasarım çıktısı tek tabaka lamina olarak yönlü elastik ve kayma değerleri (N/mm^2), poisson oranı (mm/mm) ve yoğunluk (g/m^3) değeri elde edilmiştir. Spanu yaptığı çalışmada yapay zeka ağını kullanarak biyolojik sinir sistem ağ ve hesaplamalarını tek fonksiyonda toplayarak farklı fiber hacim

oranlarında kompozit malzemelerin özelliklerini tayin etme üzerine çalışmalar yürütmüştür.[44] RVE bu modellemeleri farklı fiber hacim oranlarında meshing üzerinde interpolasyonlar yaparak çözüme ulaşır (Şekil 2.15).[45] Takviyeler için farklı fiber hacim oranlarında değerler ve grafikler elde edilmiştir.



Şekil 2.14 : Cam ve karbon fiber kumaşların filament çapı mikroskop görüntüsü



Şekil 2.15 : Ansys RVE çözümleme

2.12.Hasar Teorileri

Tabakalı hibrit kompozitler istifleme açılarının tek düze olmaması durumunda 'laminant' tek düze olmaları durumunda 'lamina' olarak adlandırılar. Hata kriterlerinin amacı laminalar üzerine uygulanan kombine edilmiş gerilim yükünün dayanım ve hasar modlarını tespit etmektir.[46] Genel olarak hepsi elastik analiz temellidir ve lamina hata kriterleri ortotropik malzemelerde 2 boyutlu stress durumları için geliştirilmiştir. Örnek verilirse, genel tensor ifadesi Tsai-Wu kriteri 2 yönlü dayanım ve 2 yönlü gerilim etkisi olacak şekilde optimize edilmiştir.[88] Kompozit tasarımda düzlem içi gerilmeleri temsil eden ifadeler;

- **X & X** : Fiber yönünde (longitudinal) çekme ve basma dayanımını
- **Y & Y**: Fiberlerin kesişim yönünde (transverse) çekme ve basma dayanımını
- **S**: Kopma Dayanımı

Uzama temelli hata modlarında X_ε,X_ε',Y_ε,Y_ε', ve S_ε olarak adlandırılır.

Lamina durumunda incelenen hata modlarını laminant modunda ön görebilmek esastır. Ansys ACP Pre –Post uygulamaları bunu gerçekleştirir (Şekil 2.16). [45] Lamina hata kriterleri 3 grupta toplanabilir.

- Limit Kriter: Bu hata kriterleri yük ve mod uygulamalarını gerilim (σ_{11}, σ_{22} ve τ_{12}) veya uzama (ε_{11}, ε_{22} ve γ_{12}) temelli incelemesini yapar. Etkileşim gerilim ve uzama değerleri dahil edilmez.[47]
- İnteraktif Kriter: Bu kriterler yük hata tahmini yapmak için stress ve uzama değerlerini tekli veya yüksek dereceli polinom denklemleri ile kullanırlar. Hata denklemin büyük veya küçük (<,>) olmasına bağlıdır.[47]
- Ayrı Mod Kriterleri: Bu hata modu matris fazı ve fiber fazının ayrı hata modları şeklinde incelenmesini sağlar. Denklemler tabakalar arası etkileşimi ve yük uygulama yönüne bağlı olarak çok yönlü davranışları çözümler. Denklem yalnızca bir gerilim bileşeni içeriyorsa yönlü gerilim bileşen kullanılır. Aksi takdirde hata kriteri gerilim/kuvvet oranına göre çözümleme oluşturur.[47] Temel olarak hata modları 6 adet olarak düşünülebilir ve aşağıda her bir kriter için ilgili formüller verilmiştir .

2.12.1.Maximum Stress (Limit Kriter)

$\frac{\sigma 11}{X} = 1$ Fiber (90°) kırılım [2.14]

$\frac{\sigma 22}{Y} = 1$ Transverse(0°) matris kırılımı [2.15]

$\frac{\tau 12}{S} = 1$ Kayma Matris (45°) kırılımı [2.16]

2.12.2.Maximum Uzama (Limit Kriter)

$\frac{\varepsilon 11}{X} = 1$ Fiber (90°) kırılım [2.17]

$\frac{\varepsilon 22}{Y} = 1$ Matris (0°) kırılım [2.18]

$\frac{\gamma 22}{S} = 1$ Kayma Matris (45°) kırılım [2.19]

İnteraktif Kriterler

2.12.3.Hill-Tsai

$$\left(\frac{\sigma 11}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma 22}{Y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma 11}{X}\right)\left(\frac{\sigma 22}{X}\right) + \left(\frac{\tau 12}{S}\right)^2 = 1 \quad [2.20]$$

2.12.4.Tsai-Wu

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_1\sigma_{11}^2 + F_2\sigma_{22}^2 + 2F_{12}\,\sigma_{11}\,\sigma_{22} + F_{66}\tau_{12}^2 = 1 \quad [2.21]$$

Eğer;

$F_1 = \frac{1}{X} + \frac{1}{X'}$ $F_2 = \frac{1}{Y} + \frac{1}{Y'}$ $F_{11} = -\frac{1}{XX}$, $F_{22} = -\frac{1}{YY}$, $F_{66} = -\frac{1}{S\hat{}2}$ = *Deneysel Değer* [2.22]

Ayrı Mod Kriterleri

2.12.5.Hashin-Rotem

$\left(\frac{\sigma 11}{X}\right) = 1$ fiber [90°] Kırılım [2.23]

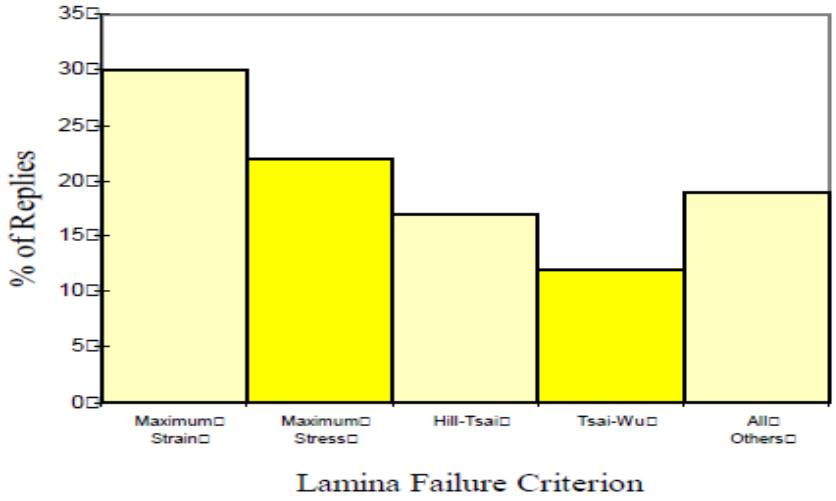
$\left(\frac{\sigma 22}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau 12}{S}\right)^2 = 1$ Matris [0°]kırılım [2.24]

2.12.6.Hashin

$\left(\frac{\sigma 11}{X}\right)^2 + \left(\frac{\tau 12}{S}\right)^2 = 1$ fiber[90°] kırılım çekme yönü [2.25]

$\left(\frac{\sigma 11}{X'}\right) = 1$ fiber[90°] kırılım basma yönü [2.26]

$\left(\frac{\sigma 22}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau 12}{S}\right)^2 = 1$ Matris [0°]kırılım [2.27]



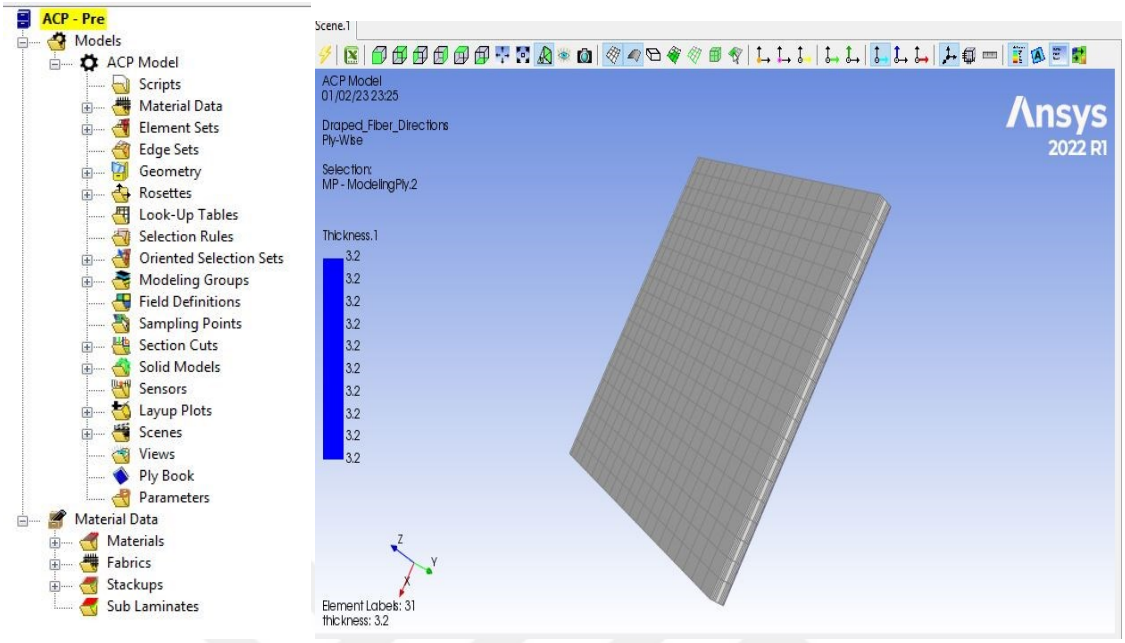
Şekil 2.16 : Hata Kriterleri Cevap Oranları Kıyaslama Grafiği [47]

2.13.ANSYS Pre-Post

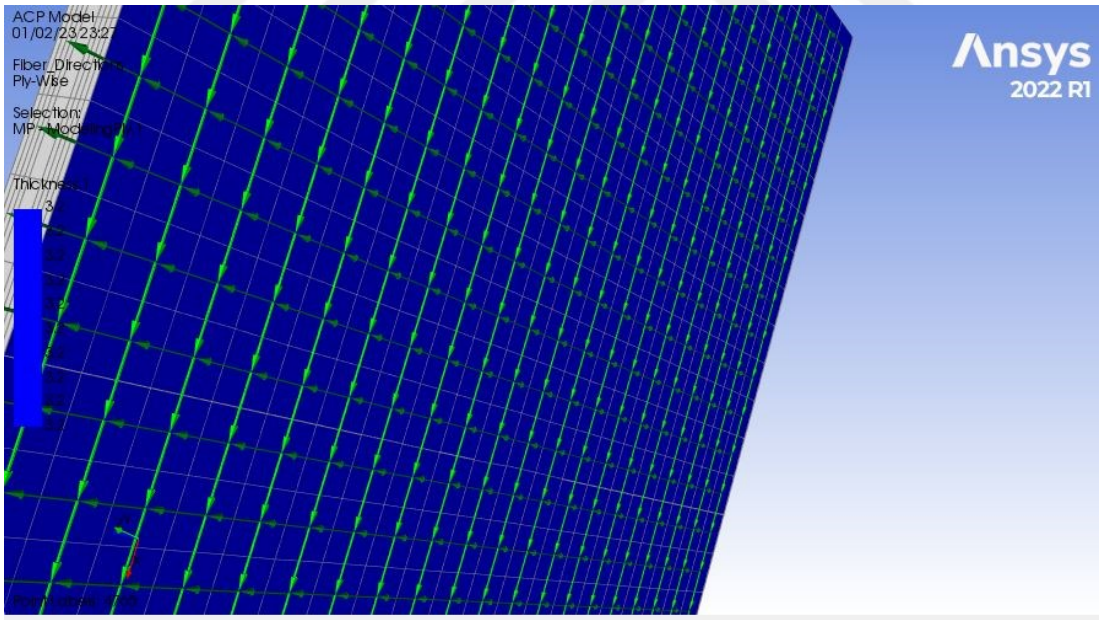
RVE modellemesi yapılan takviye elemanları üretim yöntemi gözetmeksizin Ansys ACP-Pre modulu ile matris bütünleşik kompozit tasarımı sağlar. Özellikle karmaşık geometri kompozit parçalarında, büyük kompozit parçalarda ve plaka tasarımlarında bu modul işlevseldir.[45] Katman malzemeleri ve istifleme dizilimleri tasarım parametreleridir.Amaç maliyet ve ağırlılığı düşürerek plaka uzama matrisini (D) geniş tutmaktır.[35] Bu kısımda birçok kompozit malzeme özelliği gözlemlenebilir,

- Kumaşların istif dizilimi,
- Matris malzeme tayini,
- Kumaşın top çıkışından kalıba yatırılışı serimi,
- Kumaş kalınlığı toplam parça kalınlığı,
- Malzemeye ait CLT çözümlemeleri ve polar koordinatları
- Hasar teorileri mühendislik katsayıları

gibi bir çok özelliği bu kısımda tasarlanır. ACP model ve malzeme bilgi olmak üzere iki kısımdan oluşur.[45] Çalışmamızda Ansys Pre modul çıktıları oluşturulmuştur. Ansys kompozit modellemeleri hasar teorileri, statik, dinamik (frekans ve hız) çözümlemlerini birleştirebilir. Çalışmamızın devamında tüm deneysel setleri oluşturduğumuz plaka ölçülerine (en:boy 60x60cm,kalınlık 3,2 cm,9 kat) bağlı kalarak statik analiz yapılmıştır (Şekil 2.17, Şekil 2.18).



Şekil 2.17 : Solda Ansys ACP Pre Modul Ağacı, Sağda 60X60 cm plaka modellemesi



Şekil 2.18 : Ansys ACP Pre fiber ve transverse yönlendirme

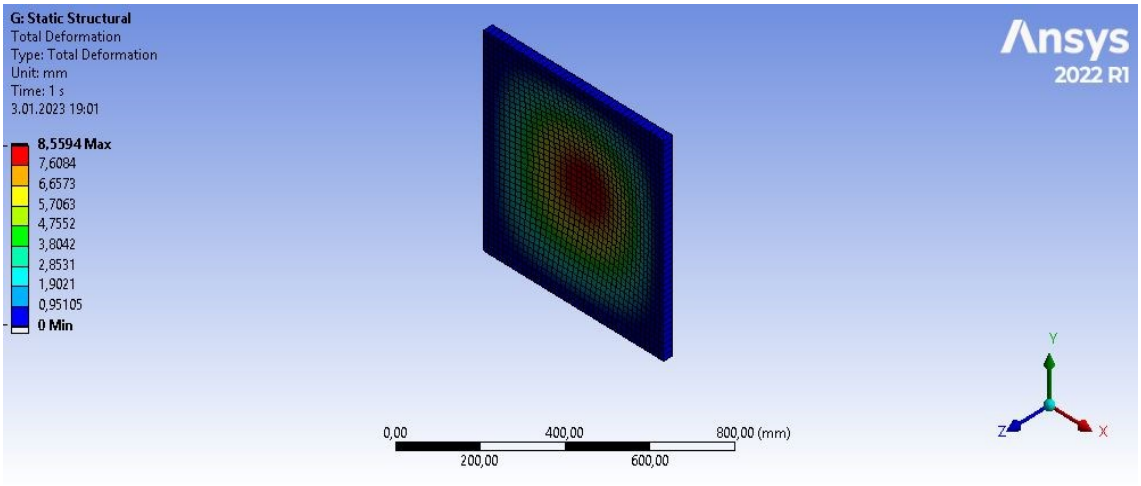
Düzlem içi gerilme kuvvetleri farklı mod şekilleri ve doğal frekans etkisi ile damper etkisi olmadan uygulanabilir.[48] Aynı zamanda enerji denklemlerinden elde edilen gerinme enerjisi düzlem içi plaka değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.[49] Düzlem içi gerilme kuvvetleri dört kenarı ankastre mesnet haline getirilmiş deney referans set plakası için sınır

şartları analizin Ansys Pre, RVE kısımlarında iteratif değerler olarak elde edilmiştir.[50] Statik analiz ve Ansys Post çıktıları CLT matrisinin katsayılarını bölüm 2.8 de belirtilen clt denklem , hibrit kompozit yapının ön gerilme ile davranışını,mühendislik katsayaları ve hasar teorilerine göre nihai hibritleşmenin doğruluğunu ifade eder.[50] Çalışmada ölçüleri bilinen plaka için dört kenar sabit mesnet olacak şekilde 1 MPa değerinde ön gerilme uygulanmıştır.Statik çözümlemede ve Ansys Post kısmında bölüm 2.12 de anlatılan hasar teorileri değerleri bulunmuştur. Hibritleşmenin doğruluğu ve yöntemin ön tasarım süreci gözlemlenmiştir. Konfügürasyonlarda elde edilen değerlerin isim analiz kodlama karşılığı Tablo 2.8'de verilmiştir.

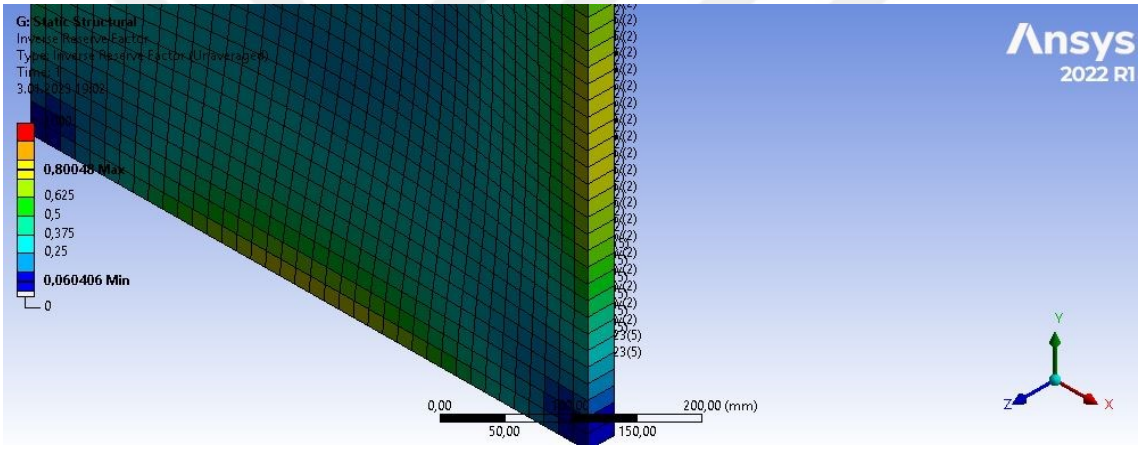
Hasar teori/Kısaltma isimleri	Maximum Stress Teorisi	Tsai-Wu Teorisi	Tsai-Hill Teorisi	Hoffman Teorisi	Hashin Teorisi
Fiber Kırılım	s1				hf
Matrix Kırılım	s2				hm
Düzlem İçi Kayma	s12				
Düzlem dışı Kayma	s13				
Deleminasyon	s3				hd
Tsai-Wu Ağırlık Faktörü		Tw			
Tsai-Hill Ağırlık Faktörü		Th			
Hoffman Ağırlık Fakötürü				ho	

Tablo 2.8 : Analiz Kısaltma Tablosu(ANSYS ACP 2022)

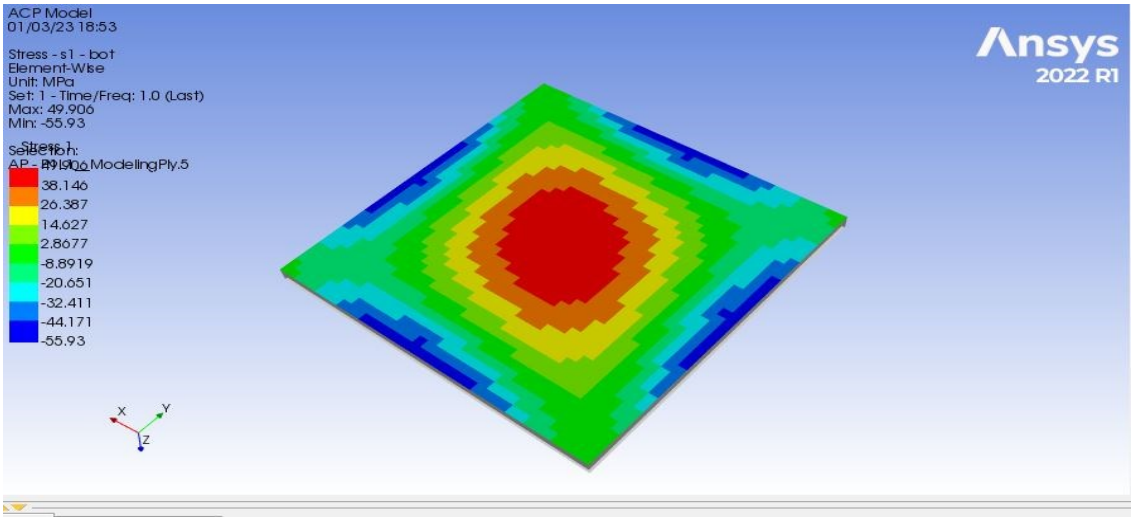
Ansys Post analiz sekmesinde yukarıda belirtilen kırılım ve özelliklerler ayrı ayrı incelenebilmektedir. Oluşturulan tabakalı hibrit kompozit yapının farklı katmanlarda etkisi gözlemlenebilmektedir. Katmanlar arasında deleminasyon olup olmayacağı, düzlem iç ve dış kayma durumları, fiber matris kırılımları üretim yöntemlerinden, standartlara uygun olarak karşılaştırılır ve yükleme durumlarından bağımsız olarak elde edilir.[45] Ön tasarım sonucunda oluşturulan tabakalı hibrit kompozit plakanın sonuçları ve değerlendirmeleri deney setlerine öntasarım fikri oluşturulması sağlanmıştır (Şekil 2.20, Şekil 2.21, Şekil 2.22).



Şekil 2.20 : Düzlem içi Toplam Defarmasyon



Şekil 2.21 : Statik Analiz Kompozit Hata Teori



Şekil 2.22 : Ansys ACP Pre Polipropilen Orta Tabaka Stress Dağılımı

2.13.1. 3 Nokta Eğme Testi Ansys Modellemesi

Bu tez çalışmasında oluşturulan sonlu elemanlar analizine ve deney set testlerinde kullanılan ISO 14125 test standartlarını birebir Ansys ACP modulu ile 3 nokta eğme testi olarak modellemek ve deney setleri ile karşılaştırmalı sonuçlar elde edilerek yapılan modellemenin doğruluğunu kıyaslamak mümkündür.[51] Üç nokta eğme testinde verilen kat sayılar ile her kat için tanımlanan ayrı takviye elemanları ve kullanılan matris elemanları tanımlanmıştır. Lamina özellikleri 'Material Designer' ' RVE' ve 'ACP modulu' ile önceden tanımlanmıştır. Yine, 3 nokta eğme testlerinde genel olarak kırılma olayı, basma yükünün uygulandığı alanda meydana gelir. Genellikle bu durum fiber ve mikro kırılımların meydana geldiği test Lo-chim Budiansky ve Fleck modellemeleri ile açıklanabilir. Lo-Chim modellemesine göre basma yükü

$$S_C = \frac{G12}{1.5+12\left(\frac{6}{\pi}\right)^2\left(\frac{G12}{E12}\right)} \qquad [2.28]$$

olarak tanımlanır ve deney setlerinden elde edilen ortalama yüzde uzama değeri (stroke) numelerin orta noktasına göre modellenir. Yükleme durumunda kuvvet elde edilir ve yük dağılımı uniform kabul edilir, ancak uniform olmayan durumda Weibull statik teorisine göre 3 nokta eğme dayanımı 30% daha fazladır.[51,36]

3.BULGULAR

3.1.Temsili Hacim Yöntemi (RVE) Çıktıları

Takviye elemanlarının Ansys Material Designer programı ile mikro, meso ve macro boyutlarında RVE yöntemi ile elde edilen çıktılar her bir takviye elemanınıa ait olmak üzere aşağıda sırası ile verilmiştir.Tüm takviye elemanları V_f oranları 0,55 alınmış olup, yine fiber çapları karbon için 8 µm ve cam için 16 µm referans değeri olarak kullanılmıştır.

3.1.1. Karbon

Karbon takviye elemanı için Tablo 3.1'de RVE yönteminden elde edilen sabit değer (constant value) yani $V_f = 0,55$ olduğunda ki değerler verilmiştir. Veriler incelendiğinde değerlerin kendi içerisinde uyumlu olduğu görülmekte olup, bu durum ise analiz sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermektedir.

Değer Ad	Değer	Birim
Elastik Modul 1 (E_1)	7.4889E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	7.4889E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	6.2752E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	1.1086E+10	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	2.0807E+09	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	2.0807E+09	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,7153	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,14783	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,14783	mm/mm
Yoğunluk(ρ)	1,299	g/cm^3
Çözüm Tamamlama Süresi	00:10:57:36	zaman(dk/sn/sls)

Tablo 3.1 : Karbon Takviye Mühendislik Değerleri(Constant Value)

Yine Tablo 3.2'de RVE yönteminden elde edilen farklı hacim oranlarında ki ($V_f = 0,32$, $V_f = 0,43$ ve $V_f = 0,55$) analiz sonuçları verilmiştir. Elde edilen değerlerin kabul edilebilir değerler olduğu ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Resim				
Fiber Hacim Oranı	0,31908	0,43218	0,54635	
Elastik Modul 1 (E_1)	6,0849E+09	6,7818E+09	7,4889E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	6,0849E+09	6,7817E+09	7,4887E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	5,6081E+09	5,9598E+09	6,2753E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	7,611E+09	9,4597E+09	1,1087E+10	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	1,7495E+09	1,9033E+09	2,0807E+09	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	1,7495E+09	1,9033E+09	2,0807E+09	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,67876	0,70487	0,71531	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,16777	0,15349	0,14783	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,16777	0,15348	0,14782	mm/mm

Tablo 3.2 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Karbon Takviye Mühendislik Değerleri

3.1.2.Cam

Karbon takviye elemanında olduğu gibi cam takviye elemanları içinde Tablo 3.3'de RVE yönteminden elde edilen sabit değerde ki (V_f = 0,55) sonuçlar verilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler incelendiğinde, değerlerin kendi içerisinde uyumlu olduğu görülmekte olup, bu durum ise Ansys analiz sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermektedir.

Değer Ad	Değer	Birim
Elastik Modul 1 (E_1)	7,7342E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	7,734E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	6,706E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	5,639E+09	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	2,4539E+09	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	2,4539E+09	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,49296	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,24144	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,24143	mm/mm
Yoğunluk(ρ)	1,537	g/cm^3
Çözüm Tamamlama Süresi	00:16:16.23	zaman(dk/sn/sls)

Tablo 3.3 : Cam Takviye Mühendislik Değerleri(Constant Value)

Tablo 3.4'de cam takviye elemanı için RVE yönteminden elde edilen, farklı hacim oranlarında ki ($V_f = 0,32$, $V_f = 0,43$ ve $V_f = 0,55$) analiz sonuçları verilmiştir. Karbon takviye elemanında olduğu gibi, elde edilen değerlerin kabul edilebilir değerler olduğu ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Resim				
Fiber Hacim Oranı(V_f)	0,26897	0,40699	0,54635	
Elastik Modul 1 (E_1)	5,5619E+09	6,5968E+09	7,7342E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	5,5619E+09	6,5967E+09	7,734E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	5,2906E+09	5,9955E+09	6,7059E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	3,5578E+09	4,6221E+09	5,6389E+09	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	1,8182E+09	2,1003E+09	2,4539E+09	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	1,8182E+09	2,1003E+09	2,4539E+09	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,47509	0,4921	0,49295	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,26442	0,24842	0,24144	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,26442	0,24842	0,24144	mm/mm

Tablo 3.4 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Cam Takviye Mühendislik Değerleri

3.1.3. Polipropilen

Karbon ve cam takviye elemanlarında olduğu gibi polipropilen için $V_f = 0,55$ için de RVE yönteminden elde edilen değerler Tablo 3.5 deverilmiştir. Veriler incelendiğinde değerlerin kendi içerisinde uyumlu olduğu görülmekte olup, bu durum ise analiz sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermektedir. Tablo 3.6'da ise $V_f = 0,32$, $V_f = 0,43$ ve $V_f = 0,55$ oranlarında polipropilen takviye elemanı mühendislik değerleri verilmiş olup, sonuçların tutarlı ve kullanılabilir olduğu görülmektedir.

Değer Ad	Değer	Birim
Elastik Modul 1 (E_1)	2,3022E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	2,3022E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	2,3044E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	8,8163E+08	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	8,1162E+08	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	8,1162E+08	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,39049	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,37733	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,37734	mm/mm
Yoğunluk(ρ)	0,987	g/cm^3
Çözüm Tamamlama Süresi	00:18:26.70	zaman(dk/sn/sls)

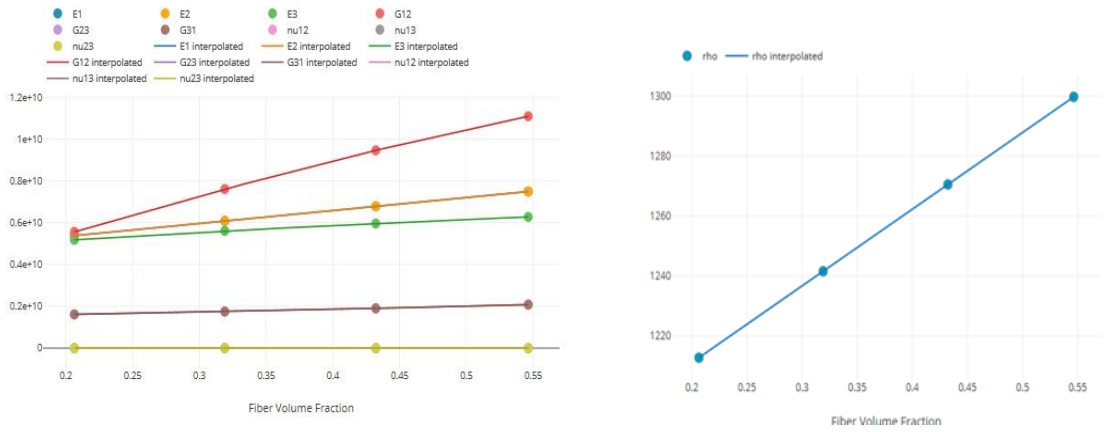
Tablo 3.5 : Polipropilen Takviye Elemanı Mühendislik Değerleri (Constant Value)

Resim				
Fiber Hacim Oranı	0,26897	0,40699	0,54635	
Elastik Modul 1 (E_1)	2,9788E+09	2,6237E+09	2,3022E+09	Pa
Elastik Modul 2 (E_2)	2,9788E+09	2,6237E+09	2,3022E+09	Pa
Elastik Modul 3 (E_3)	3,0075E+09	2,647E+09	2,3044E+09	Pa
Kayma Modul 1 (G_{12})	1,1359E+09	1,0075E+09	8,8163E+08	Pa
Kayma Modul 2 (G_{23})	1,055E+09	9,2181E+08	8,1162E+08	Pa
Kayma Modul 3 (G_{31})	1,055E+09	9,2181E+08	8,1162E+08	Pa
Poisson 1 (v_{12})	0,3761	0,3857	0,39049	mm/mm
Poisson 2 (v_{13})	0,35763	0,36531	0,37733	mm/mm
Poisson 3 (v_{23})	0,35763	0,36531	0,37734	mm/mm

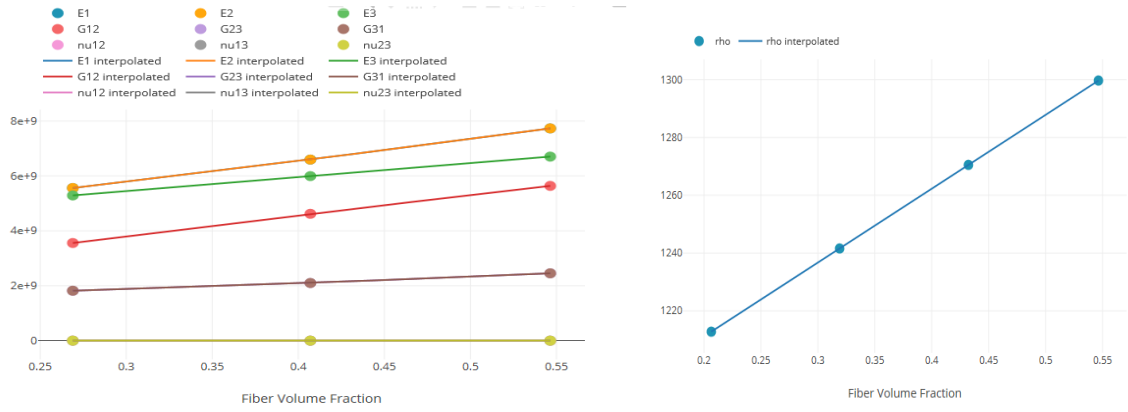
Tablo 3.6 : Farklı Fiber Hacim Oranlarında Poipropilen Takviye Mühendislik Değerleri

3.1.4.Temsili Hacim Yöntemi (RVE) Analiz Grafikleri

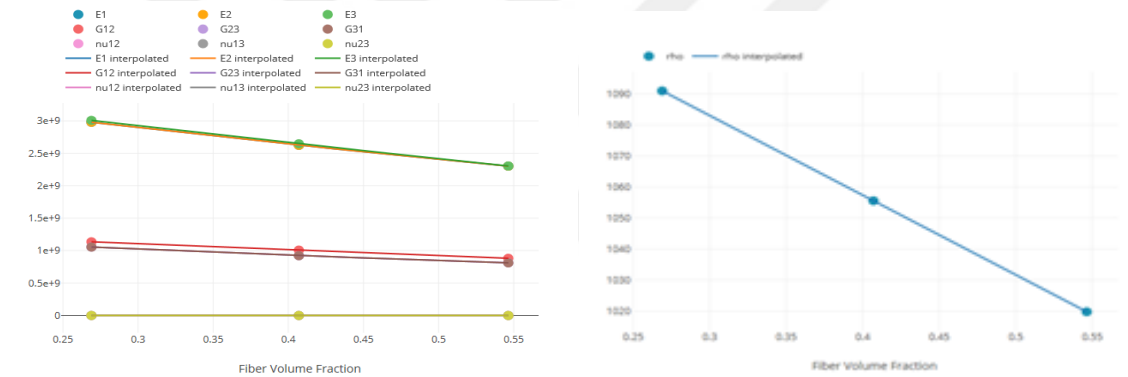
Karbon, cam ve polipropilen takviye elemanları için RVE analiz sonuçlarından elde edilen Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri aşağıda verilmiştir. Bu analizde yazılım programı tarafından fiber hacimsel oranlarına bağlı interpolasyonlar yapılarak grafikler elde edilmiştir. Şekil 3.1'de Karbon Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri verilmiş olup, mühendislik değerleri ve yoğunluklar beklenildiği gibi fiber hacım oranlarıyla (V_f) lineer artışlar göstermiştir. Bu bağlamda karbon takviye malzemesinin hacimsel olarak artışının beklenildiği gibi olumlu etkilere sebep olduğu görülebilir. Yine, Şekil 3.2'de gösterilen grafiklerde cam takviye malzemesi içinde aynı bulgular gözlemlenmiş olup, buda beklenilen bir durumdur. Polipropilen takviye malzemesi için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri Şekil 3.3'de verilmiştir. Bu grafiklerde karbon ve cam takviyelerin aksine mühendislik değerleri ve yoğunluklar beklenildiği gibi fiber hacım oranlarıyla (V_f) lineer azalış göstermiştir. Bunun nedeni polipropilenin mekanik özelliklerinin ve yoğunluğunun epoksi reçineden daha düşük olmasındandır. Dolayısıyla polipropilen hacımsal oranda ve ağırlık olarak arttıkca mekanik özelliklerin veya mühendislik değerlerinin yoğunlukla birlikte azalması malzemenin karakteristiğinden olduğu da aşikardır.



Şekil 3.1 : Sırasıyla Karbon Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri



Şekil 3.2 : Sırasıyla Cam Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri



Şekil 3.3 : Sırasıyla Polipropilen Takviye için Mühendislik Değerleri/V_f ve yoğunluk/V_f interpolasyon grafikleri

3.2.Ansys ACP-Pre – Post Süreç Analiz Çıktıları

Ansys ACP (Ansys Composite Process-Ansys Kompozit Süreci) Pre modül ön tasarım ve çözümleme süreci, birçok seri analiz aşamalarından oluşur. Kompzozit malzeme üretimi ile neredeyse aynı aşamaların olduğu söylenebilir. Konuyla ilgili detaylar, çalışmanın 2.8 kısmında detaylı olarak verildiği için burada sadece analizden elde edilen sonuçlara ve kısa açıklamalara değinilmiştir. Analiz aşamaları özetlenecek olursa ilk olarak lamina aşamasından laminant aşamasına geçiş, sonrasında normalleştirilmiş matris ile çözüm ve öngerilme uygulanarak nihai çözümle laminant davranışlarının bulunması olarak ta anlatılabilir. Burada örnek olarak 9 tabakalı kompozit malzemenin analiz çözümleri yapılmıştır. Tablo 3.7'de 9L kompozit malzemeye ait ön tasarım plaka laminat mühendislik değerleri verilmiştir. Ve yine Tablo 3.8'de 9L kompozit malzemenin normalleştirilmiş

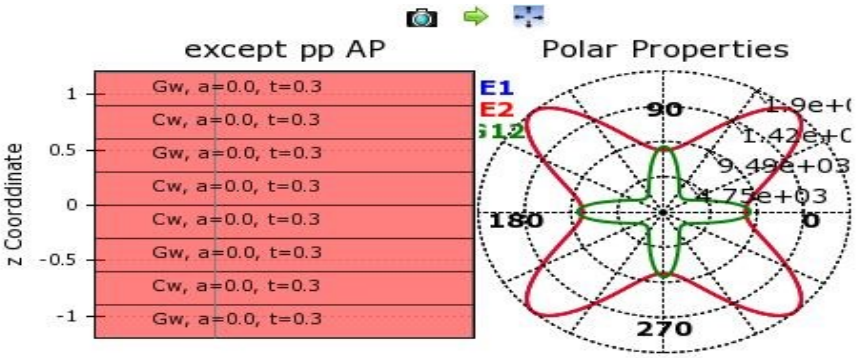
laminant uzama matrisi örnek olarak verilmiş olup, bu 6x6 matristeki B matris (bakınız 2.8) değerlerinin 0 olması istifleme sırasının doğru olduğunu ve polipropilen takviye elemanın kullanabilirliğini göstermektedir.

Değer Adı	Değer	Birim
Laminant Eğme Kayma	2246.32	MPa
Laminant Eğme Kayma (E_1)	22332.6	MPa
Laminant Eğme Kayma (E_2)	22332.6	MPa
Laminant Kayma Uzama	2140.42	MPa
Laminant Uzama (E_1)	21889.8	MPa
Laminant Uzama (E_2)	21889.8	MPa
Düzlem Dışı Kayma (G_{23})	1471.99	MPa
Düzlem Dışı Kayma (G_{31})	1471.99	MPa
Kayma Düzeltme Faktörü	0.444	nA
Kayma Düzeltme Faktörü	0.457	nA

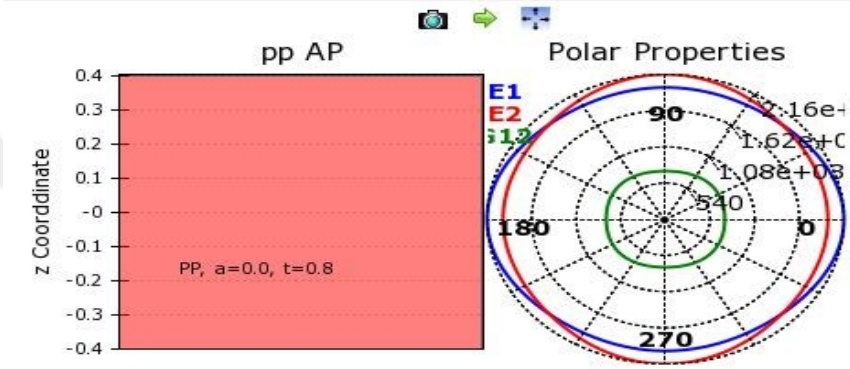
Tablo 3.7 : Ön tasarım plaka laminat mühendislik değerleri

i	0	1	2	3	4	5	6
0	22070.78	1998.445	-0.07411657	7.626098e-13	1.173246e-13	-4.699357e-18	0
1	1998.445	22070.78	,-0.07411657	1.173246e-13	7.626098e-13	1.246574e-13	0
2	-0.07411657	-0.07411657	2140.42	-4.699357e-18	-7.384703e-18	1.246574e-13	0
3	7.626098e-13	1.173246e-13	-4.699357e-18	-7.384703e-18,	1.246574e-13	-5.594472e-18	0
4	1.173246e-13	7.626098e-13	-5.594472e-18	2053.242	22519.81	-0.07786241	0
5	-4.699357e-18	-7.384703e-18	1.246574e-13	-0.07786241	-0.07786241	2246.319	0
6	0	0	0	0	0	0	2040.2

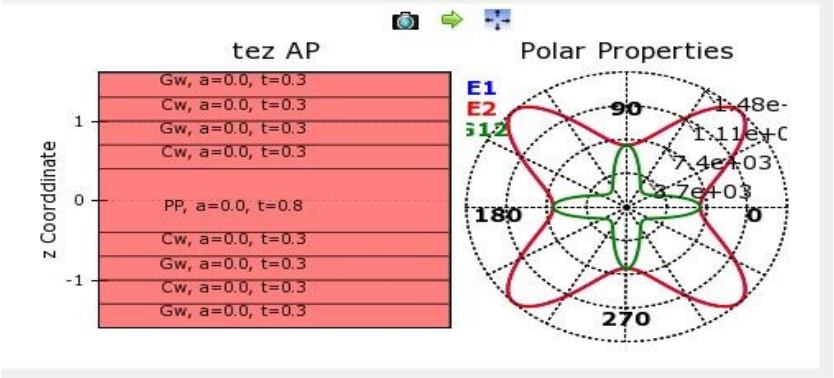
Tablo 3.8 : Normalleştirilmiş Laminant Uzama Matris



Şekil 3.4 : Cam Karbon takviye Polar Koordinat ve istif dizilimi



Şekil 3.5 : Polipropilen takviye Polar Koordinat ve istif dizilimi

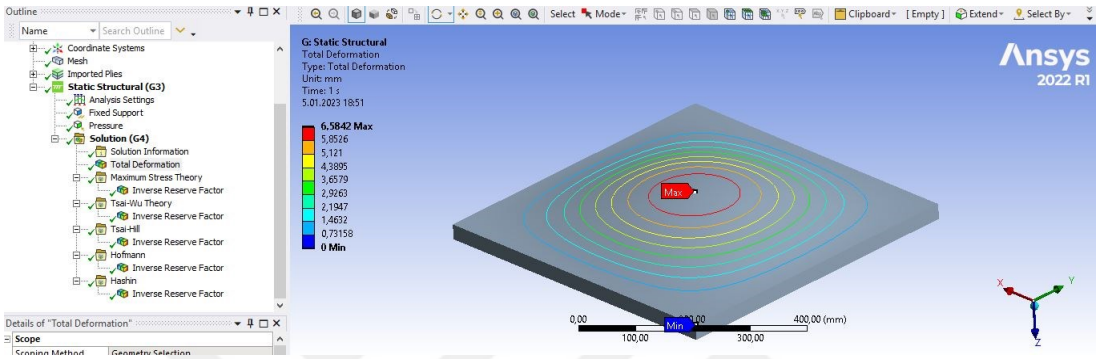


Şekil 3.6 : Ön tasarım 9L Polar Koordinat ve istif dizilimi

Ansys analiz çözümleme sırasında elde edilen ve Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 de verilen her bir takviye elemanı için polar koordinat ve istif dizilimleri gösterilmiştir. Öyleki, polar koordinat sistemi takviye elemanlarının herhangi bir açı altında herhangi bir yüke maruz kaldığında nasıl mekanik davranış gösterdiğini kullanıcıya ifade eden grafiklerdir.

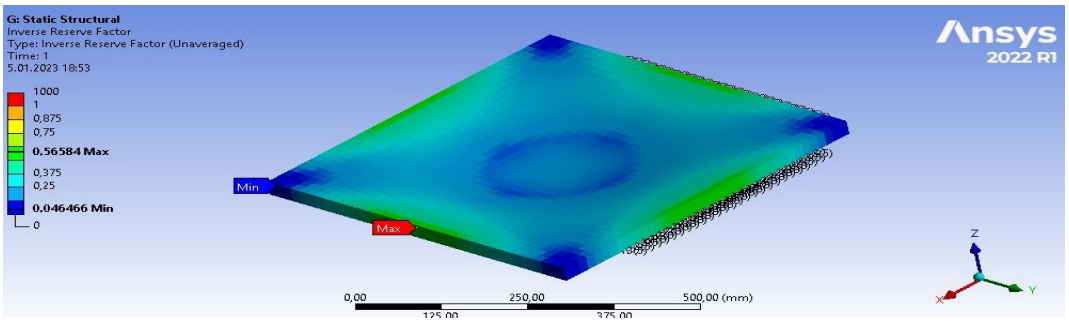
3.3.Temel Analiz-Tabaka Davranışı

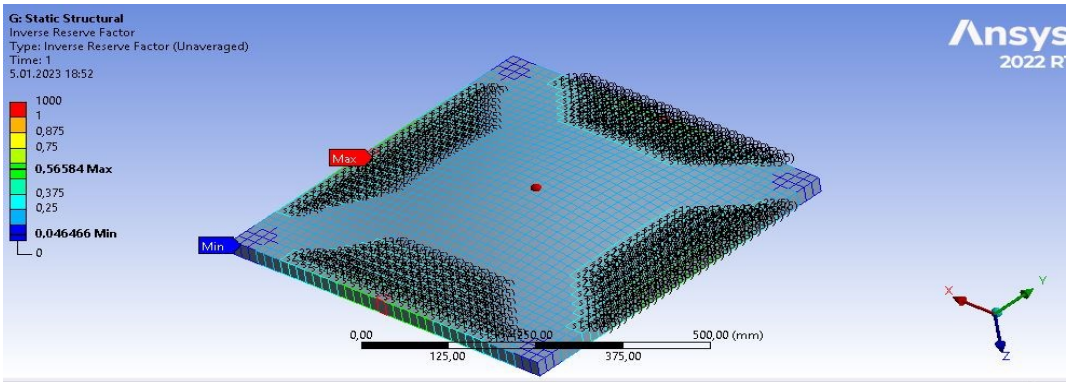
ACP Pre modulunde modellenen plaka statik yapı analiz (Static Structural) modülünde modellenerek daha önce bölüm 2.8'de anlatılan teorilerin çıktıları ve Şekil 3.7'de 9L kompozit malzemenin ön gerilme plaka davranışı gösterilmiştir. Beklenildiği gibi 1 MPa öngerilmeye karşılık ön tasarım kompozit malzeme cevap olarak 6.58 MPa toplam deformasyon göstermiştir.



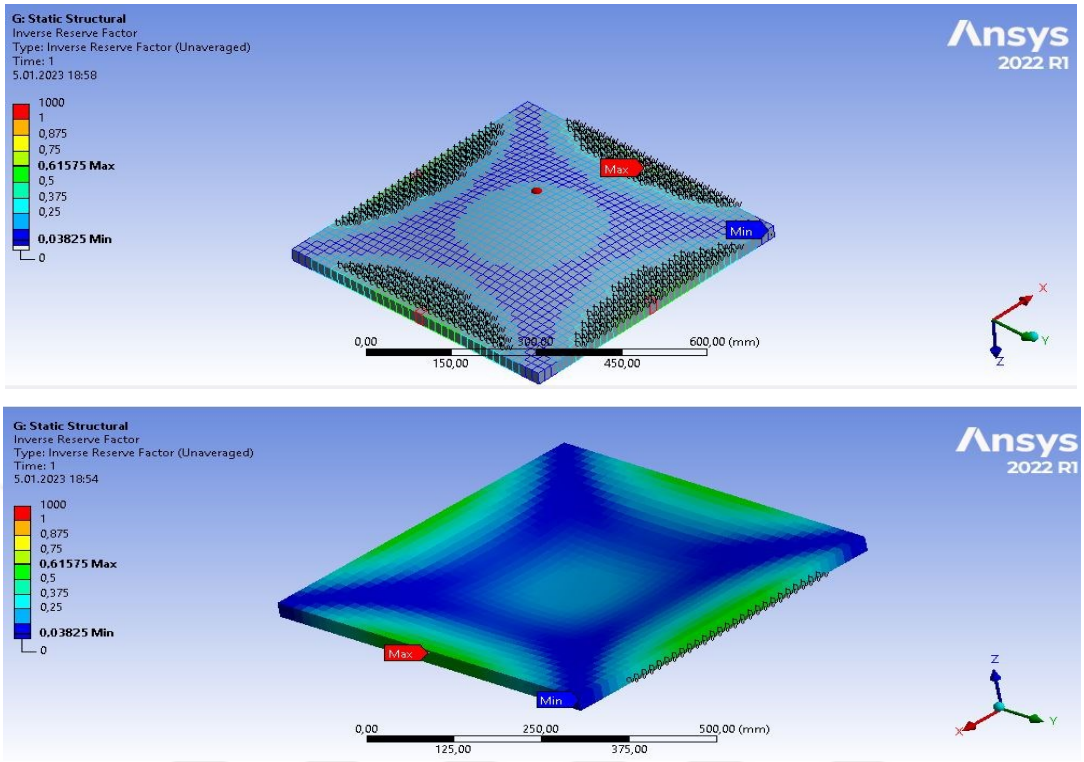
Şekil 3.7 : Temel analiz araç çubuğu ve ön gerilme durumunda plaka davranışı

Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de 9L kompozit malzeme analiz çözümlerinin, güvenilirliğinin kontrolü için her bir hasar teorisiyle kontrol eden ve uygunluğunu gösteren statik temel yapı analiz çözüm resimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 9L kompozit malzemenin öngerilme yüküne karşı verdiği toplam cevap gerilme değerlerinin tüm kriterler için uygun olduğu görülmektedir.

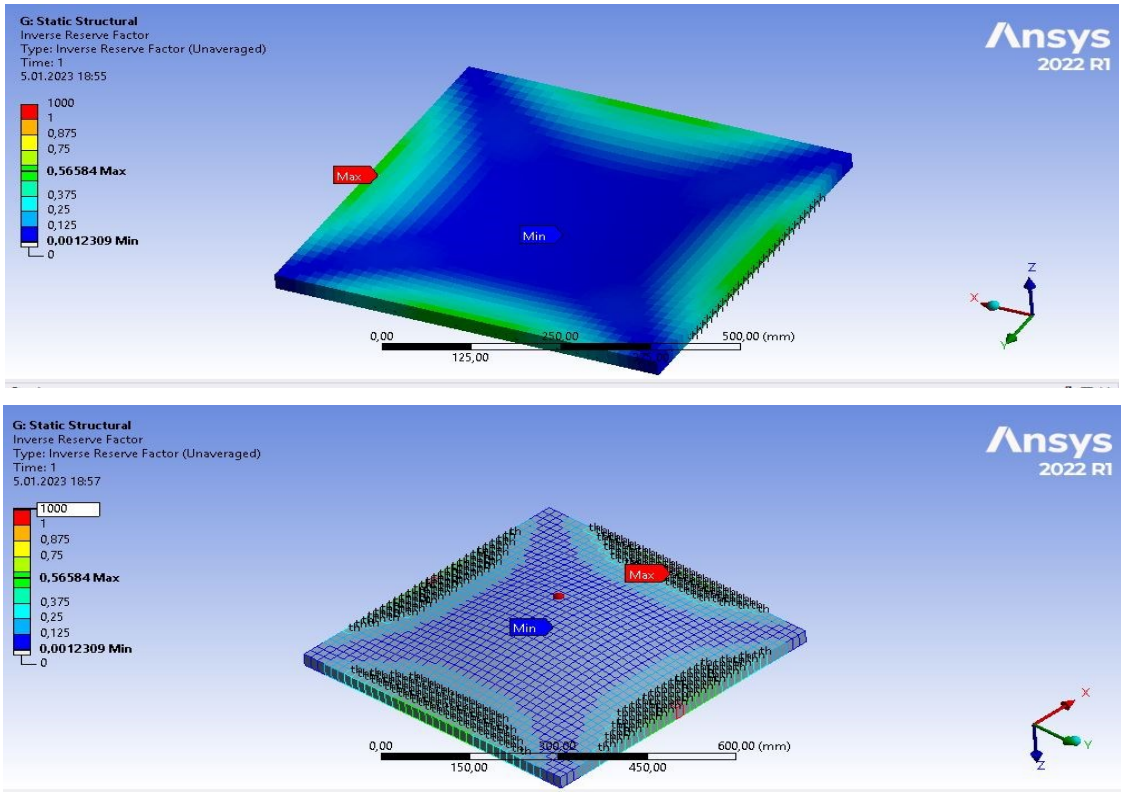




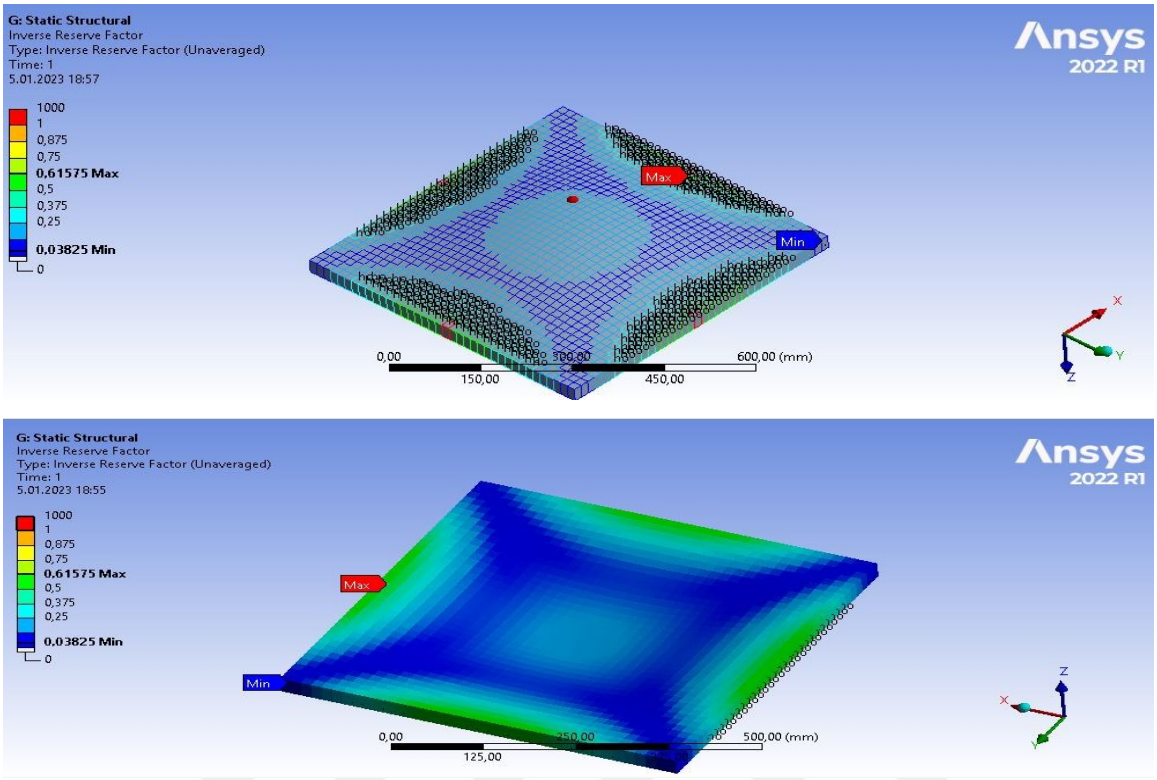
Şekil 3.8 : Maximum Stress Teori Plaka Davranışı



Şekil 3.9 : Tsai-Wu Teori Plaka Davranışı



Şekil 3.10 : Tsai-Hill Teori Plaka Davranışı



Şekil 3.11 : Hofmann Teori Plaka Davranışı

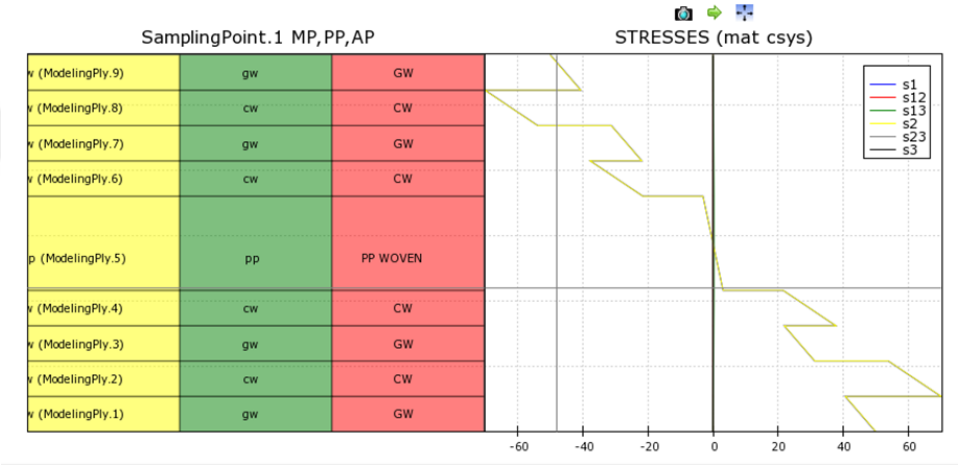
3.4.Post Süreç Analiz İnceleme

Ansys Post süreçlerinde 9L kompozit malzemenin verilen herhangi bir yük uygulamasında laminantların göstermiş olduğu tepki değerleri elde edilmiştir. Tablo 3.12'de 1 Mpa öngerilme uygulanmış 9L kompozit malzemenin, matris giriş değerleri olan kuvvet, moment ve eğrilik değerleri gösterilmiştir. Ayrıca, Ansys Post süreçleri; hata kriterleri, ön gerilmeli plaka davranışında giriş matris değerleri ve plaka eğrilik düzlem değerlerini görmeyi sağlamaktadır.

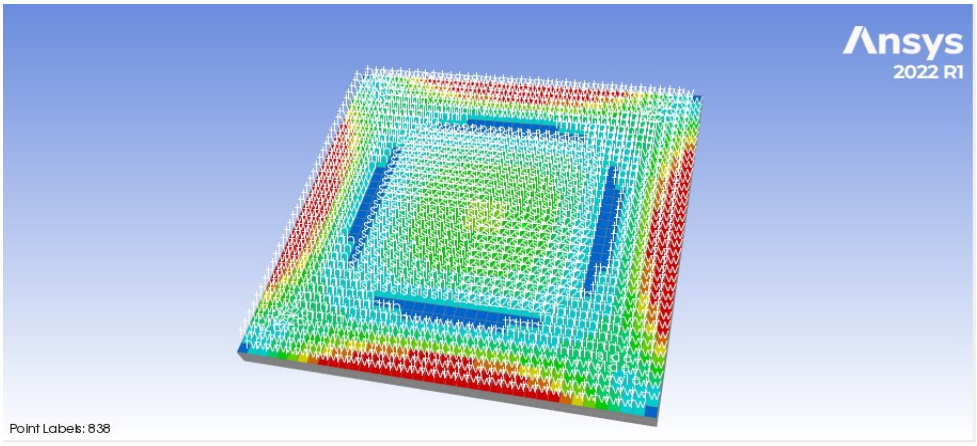
Değer ad	Değer	Birim
M_X	8611.67	N.m
M_Y	8611.67	N.m
M_{XY}	5.39223	N.m
N_X	-0.00503	N
N_Y	-0.00503	N
N_{XY}	-4.1455	N
Q_X	-3.94511	-
Q_Y	3.94511	-

Tablo 3.9 : Ön gerilmeli plaka kuvvet moment ve eğrilik değerleri

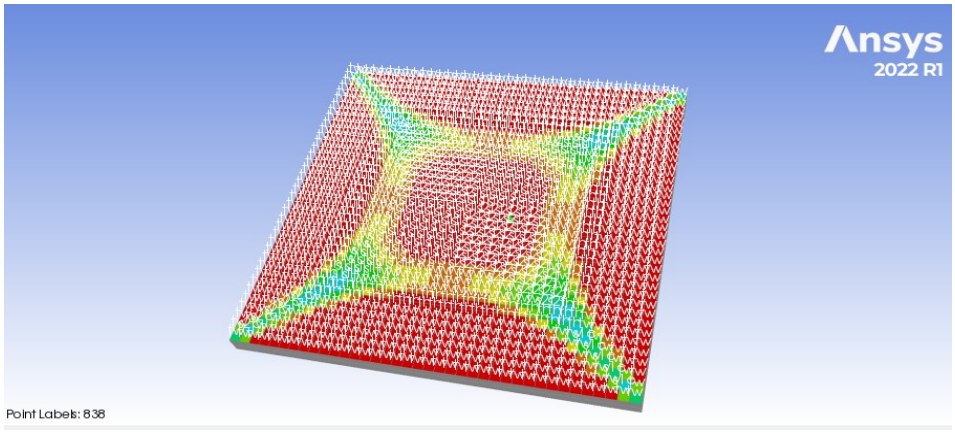
Şekil 3.12'de 9L kompozit malzemenin istifleme sırası ve tabakaların maruz kaldığı gerilme dağılım grafiği gösterilmiş olup, beklenildiği gibi simetrik gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de her bir tabakanın sırasıyla post süreç katman davranışları gösterilmiştir. Bu grafiklerde karbon kumaş ve cam kumaşın 1 MPa ön gerilme yüküne karşı göstermiş olduğu katman davranışları beklenildiği gibi çıkmıştır (Bakınız Şekil 3.13~3.20). Şekil 3.17'de görülen polipropilen katmanı, simetrinin bitiş ve başlangıcını ifade etmekte olup, buda tarafsız eksenin beklenildiği gibi tam orta tabakada olmasının bir göstergesidir.



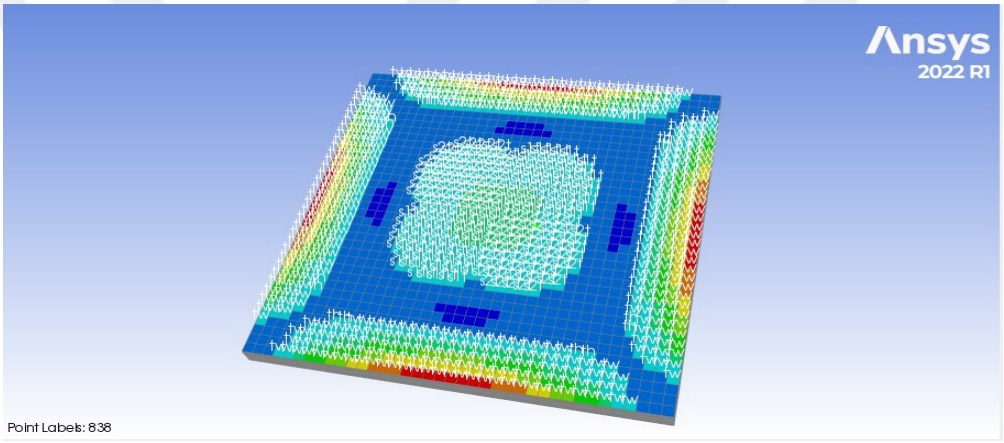
Şekil 3.12 : Ön tasarım plaka istif dizilimi ve stress dağılımı



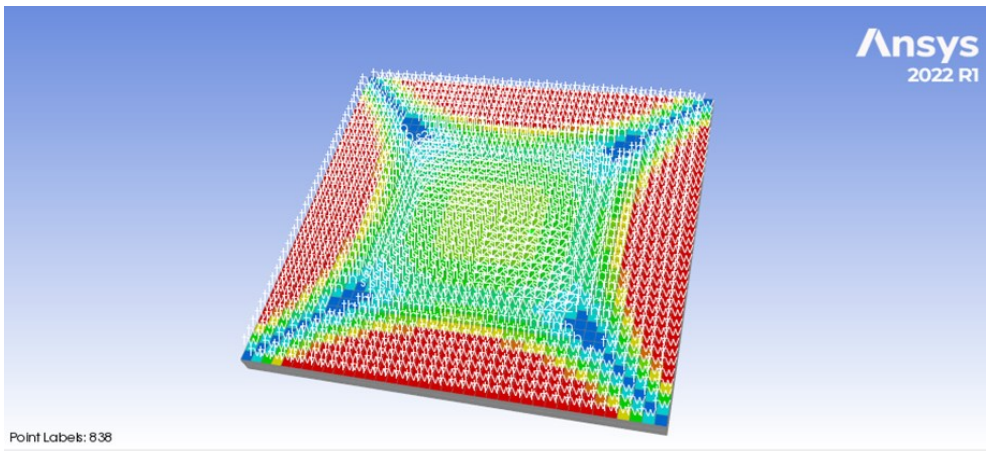
Şekil 3.13 : Post Süreç 1. Katman Davranışı



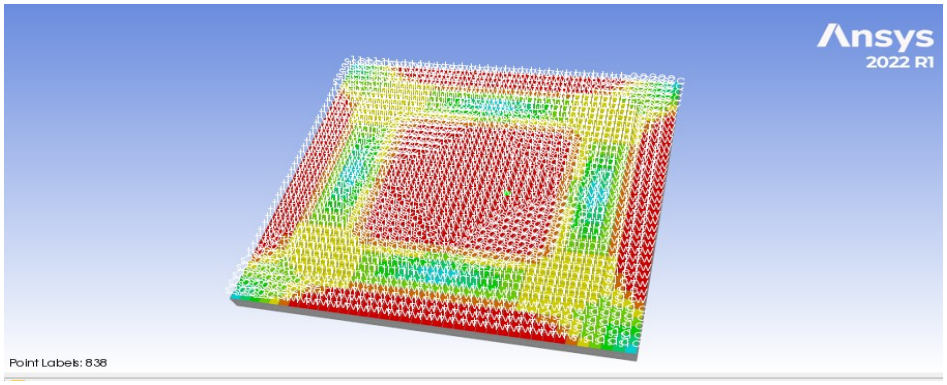
Şekil 3.14 : Post Süreç 2. Katman Davranışı



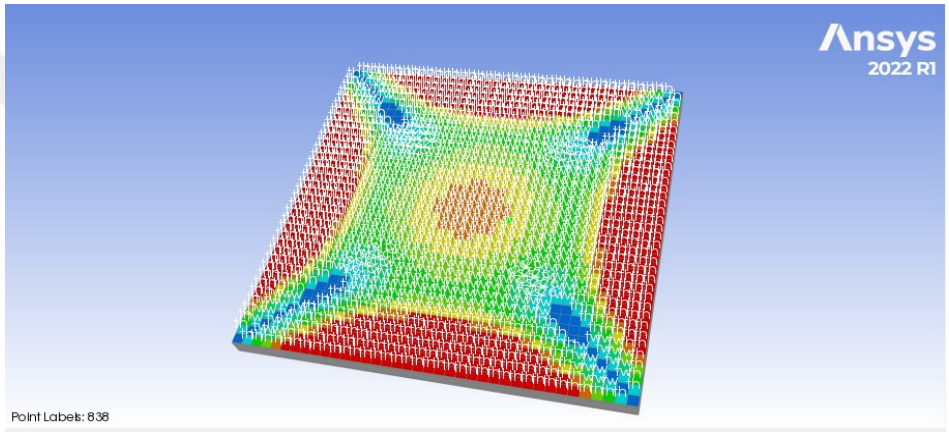
Şekil 3.15 : Post Süreç 3. Katman Davranışı



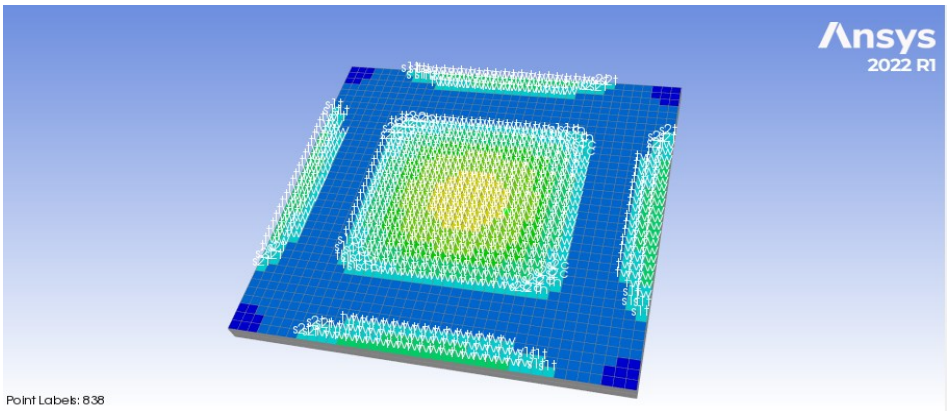
Şekil 3.16 : Post Süreç 4. Katman Davranışı



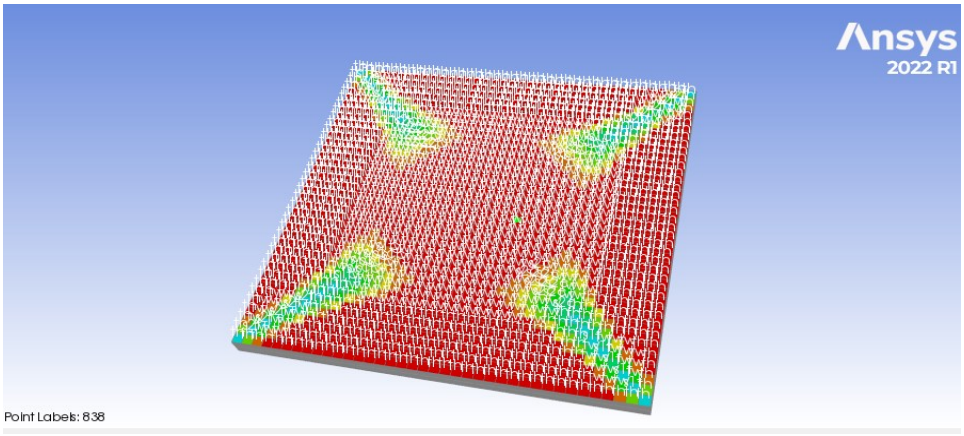
Şekil 3.17 : Post Süreç 5. Katman Davranışı



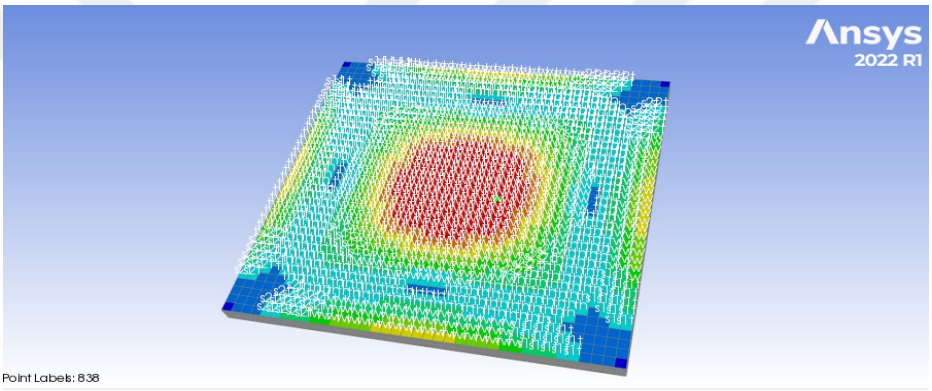
Şekil 3.18 : Post Süreç 6. Katman Davranışı



Şekil 3.19 : Post Süreç 7. Katman Davranışı



Şekil 3.20 : Post Süreç 8. Katman Davranışı



Şekil 3.21 : Post Süreç 9. Katman Davranışı

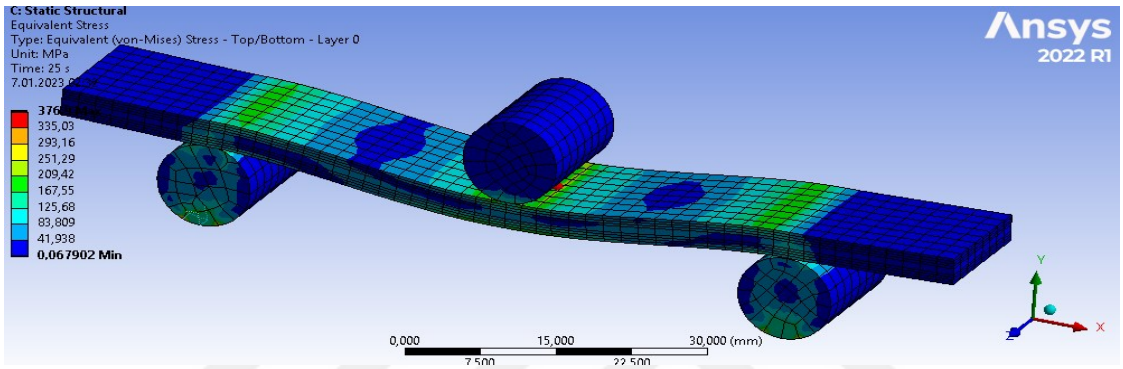
3.6. Üç Nokta Eğme Ansys Analiz Sonuçları

Ön tasarım modellemesi, EN:ISO 14125 standartlarına göre yapılmış olup, mekanik testlerde uygulanan eş yükleme ve ortam koşullarında analiz modellemesi yapılmıştır. Detayları bölüm 2.13.1'de verilmiş olan ve Ansys Pre modülünde elde ettiğimiz mühendislik elastik ve kayma modül değerlerini, Lo-Cim modeline uyguladığımızda elde edilen S_C=288,9 MPa için ön tasarım 3 nokta eğme sonuçları 9L kompozit malzeme için Tablo 3.15'de verimiştir.

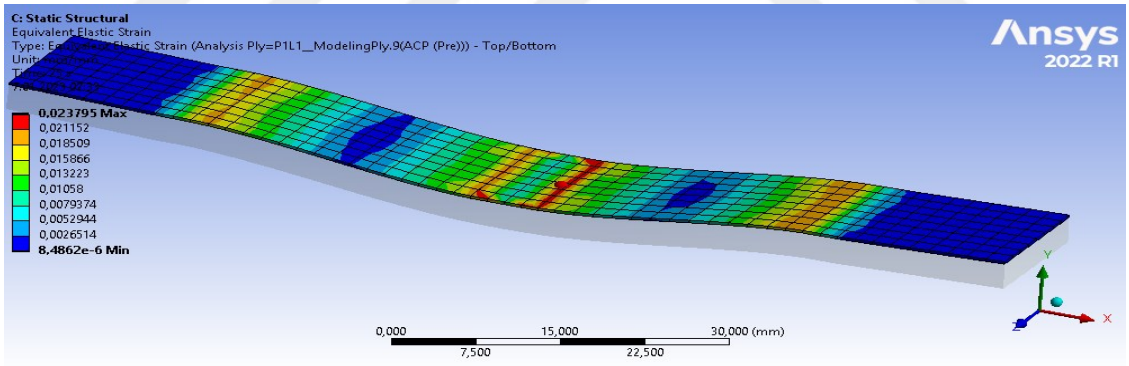
Parametre	**Kuvvet**	**3 Nokta Eğme Dayanımı**	**Uzama**	**Kalınlık**	**Genişlik**	**Span**
Numune	N	MPa	mm/mm	mm	mm	Mm
Y-1	**565,9**	**376,9**	**0,0235**	**3,20**	**15**	**65,00**

Tablo.3.10 : Ön tasarım 3 Nokta Eğme Sonuçları

Şekil 3.23'de Ansys post analizden elde edilen 9L kompozit malzeme için 3 nokta eğme testi ortalama gerilim dağılımı verilmiştir. Burada eğme dayanımı 376.9 MPa olduğu ve Şekil 3.24'de ise şekil değiştirme (uzama) miktarının ise 0.0235 olduğu görülmektedir. Ayrıca analiz görüntüsünden gerilim ve şekil değiştirme çıktıları incelendiğinde en yüksek gerilmenin ve uzamanı orta kısımda oluştuğu, diğer yüksek gerilmelerin ve uzamanında mesnetlerde oluştuğu görülmektedir. Buda modellemenin ve analizin doğruluğunun beklenildiği gibi olduğunun göstergesidir. Yine, Şekil 3.25'de 3 nokta eğme kuvveti dağılımı incelendiğinde, kuvvet dağılımının tutarlı bir şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.23: 3 Nokta Eğme Testi Ortalama Stress Dağılımı



Şekil 3.24: 3 Nokta Eğme Testi Ortalama Uzama Dağılımı



Şekil 3.25: 3 Nokta Eğme Kuvveti Dağılımı

3.5. Mekanik Test Sonuçları

Bu bölümde, üç nokta eğme testi, tabakalar arası kayma testi (ILSS), çekme testi sonuçları ve fiber hacim-ağırlık oranları, yoğunluk v.b. bulunan değerler tablolar halinde verilmiştir.

3.5.1. 3 Nokta Eğme Testi (Flexural test)

Üç nokta eğme testleri EN:ISO 14125 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.16, Tablo 3.17, Tablo 3.18 ve Tablo 3.19 iki farklı tür ve her türden iki farklı tabakalarda (5L & 9L) 4 tip kompozit malzeme için 3 nokta eğme testi sonuçları verilmiştir. Tablolar incelendiğinde, en yüksek 3 nokta eğme dayanımı ve elastik modül değerleri Tip 1 kompozit malzemede görülmüştür.

Parametre	**Kuvvet**	**3 Nokta Eğme Dayanımı**	**Elastik Modülü**	**Kalınlık**	**Genişlik**	**Span**
Numune	**N**	**MPa**	**GPa**	**mm**	**mm**	**Mm**
1-1	648,78	396,25	28,64	3,20	14,87	62,00
1-2	634,56	373,67	28,68	3,28	14,68	62,00
1-3	573,19	377,31	26,19	3,07	14,99	62,00
1-4	550,25	392,81	29,81	2,95	14,97	62,00
1-5	651,53	395,89	28,90	3,24	14,58	62,00
1-6	624,88	402,98	27,69	3,11	14,91	62,00
1-7	633,91	357,42	27,01	3,36	14,61	62,00
1-8	632,03	397,10	27,43	3,17	14,73	62,00
Ort	**618,64**	**386,68**	**28,04**	**3,17**	**14,79**	**62,00**
Std. Dev.	36,72	15,59	1,10	0,13	0,16	0,00
CoV(%)	5,94	4,03	3,91	4,06	1,10	0,00

Tablo 3.11 : Tip 1 3 Nokta Eğme Test Sonuçları

Parametre	**Kuvvet**	**3 Nokta Eğme Dayanımı**	**Elastik Modul**	**Kalınlık**	**Genişlik**	**Span**
Numune	**N**	**MPa**	**GPa**	**mm**	**mm**	**Mm**
2-1	428,41	282,02	19,69	3,13	14,42	62,00
2-2	372,63	246,32	18,47	3,10	14,64	62,00
2-3	380,28	248,24	18,41	3,11	14,73	62,00
2-4	422,16	285,74	19,56	3,05	14,77	62,00
2-5	384,81	262,24	17,95	3,05	14,67	62,00
2-6	388,94	253,41	17,64	3,13	14,57	62,00
2-7	451,22	294,34	18,87	3,11	14,74	62,00
2-8	399,88	264,69	17,79	3,10	14,62	62,00
Ort	**403,54**	**267,12**	**18,55**	**3,10**	**14,65**	**62,00**
Std. Dev.	27,55	18,19	0,72	0,03	0,11	0,00
CoV(%)	6,83	6,81	3,91	1,02	0,77	0,00

Tablo 3.12 : Tip 2 3 Nokta Eğme Sonuçları

Parametre	Kuvvet	3 Nokta Eğme Dayanımı	Elastik Modul	Kalınlık	Genişlik	Span
Numune	**N**	**MPa**	**GPa**	**mm**	**mm**	**Mm**
3-1	400,63	251,06	24,05	3,25	14,73	65,00
3-2	598,09	353,20	22,86	3,34	14,80	65,00
3-3	561,59	334,13	25,34	3,34	14,69	65,00
3-4	521,47	328,58	22,78	3,24	14,74	65,00
3-5	635,81	399,01	25,49	3,24	14,80	65,00
3-6	533,72	311,13	27,07	3,38	14,64	65,00
3-7	533,94	312,04	25,42	3,37	14,69	65,00
3-8	637,69	428,01	30,59	3,15	14,64	65,00
Ort	**564,10**	**339,68**	**24,83**	**3,29**	**14,72**	**65,00**
Std. Dev.	44,62	32,97	1,68	0,08	0,06	0,00
CoV(%)	7,91	9,71	6,77	2,46	0,43	0,00
Numune 3-1 ve 3-8 Ortalama değerlere dahil edilmemiştir.*						

Tablo 3.13 : Tip 3 3 Nokta Eğme Test Sonuçları

Parametre	Kuvvet	3 Nokta Eğme Dayanımı	Elastik Modul	Kalınlık	Genişlik	Span
Numune	**N**	**MPa**	**GPa**	**Mm**	**mm**	**Mm**
4-1	495,28	309,59	22,05	3,25	14,54	64,00
4-2	521,31	340,35	22,02	3,19	14,45	64,00
4-3	566,00	355,50	23,85	3,24	14,56	64,00
4-4	578,38	375,56	21,64	3,18	14,62	64,00
4-5	519,53	339,21	22,08	3,18	14,54	64,00
4-6	604,03	381,74	21,13	3,23	14,56	64,00
4-7	613,06	393,12	22,40	3,20	14,62	64,00
4-8	556,97	366,42	24,00	3,14	14,80	64,00
Ort	**556,82**	**357,69**	**22,40**	**3,20**	**14,59**	**64,00**
Std. Dev.	42,05	27,23	1,01	0,04	0,10	0,00
CoV(%)	7,55	7,61	4,53	1,15	0,70	0,00

Tablo 3.14 : Tip 4 3 Nokta Eğme Test Sonuçları

3.5.2. Tabakalar Arası Kayma (ILSS) Test Sonuçları:

Tabakalar arası kayma testleri ASTM D-2344 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.20 ve Tablo 3.21'de tip 1 ve tip 2 kompozit malzemeler için tabakalar arası kayma test sonuçları verilmiştir. Tablolar incelendiğinde, en yüksek tabakalar arası kayma dayanımı ve kuvvet değerleri Tip 1 kompozit malzemede görülmüştür.

Parametre	**Kuvvet**	**ILSS**	**Kalınlık**	**Genişlik**	**Span**
Numune	**N**	**MPa**	**Mm**	**mm**	**Mm**
3-1	1857,81	25,14	3,47	15,97	17,00
3-2	1424,38	19,27	3,46	16,02	17,00
3-3	1646,25	22,08	3,48	16,07	17,00
3-4	1764,69	23,66	3,49	16,03	17,00
3-5	1385,94	18,84	3,44	16,04	17,00
3-6	1528,75	20,38	3,51	16,03	17,00
3-7	1652,50	21,97	3,53	15,98	17,00
3-8	1980,94	27,46	3,38	16,01	17,00
Ort	**1738,49**	**23,45**	**3,48**	**16,02**	**17,00**
Std. Dev.	163,46	2,55	0,05	0,03	0,00
CoV(%)	9,40	10,87	1,50	0,19	0,00
Numune 3-2 ve 3-5 Ortalama değerlere dahil edilmemiştir.*					

Tablo 3.15 : Tip 3 Tabakalar Arası Kayma Test Sonuçları

Parametre	**Kuvvet**	**ILSS**	**Kalınlık**	**Genişlik**	**Span**
Numune	**N**	**MPa**	**mm**	**mm**	**Mm**
1-1	1934,69	32,22	3,21	14,03	16,00
1-2	2006,56	33,54	3,20	14,02	16,00
1-3	2113,13	34,37	3,31	13,93	16,00
1-4	1938,44	32,77	3,16	14,04	16,00
1-5	1904,06	32,54	3,15	13,93	16,00
1-6	2047,19	33,62	3,25	14,05	16,00
1-7	1863,75	31,22	3,20	13,99	16,00
1-8	2053,13	33,93	3,23	14,05	16,00
Ort	**1982,62**	**33,03**	**3,21**	**14,01**	**16,00**
Std. Dev.	80,08	0,97	0,05	0,05	0,00
CoV(%)	4,04	2,92	1,48	0,33	0,00

Tablo 3.16 : Tip 1 Tabakalar Arası Kayma Test Sonuçları

3.5.3. Fiber Hacim-Ağırlık Oranları, Yoğunluk Değerleri (EN:ISO 1172)

Ağırlıkça fiber (W_f) ve hacimsel fiber (V_f) oranları yakma deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Yine 4 tip içinde kompozit malzemerin yoğunlukları bulunmuştur. Sonuçlar (Tablo 3.22) incelendiğinde kendi içerisinde tutarlı olduğu görülmektedir.

Numune	W_f (wt%)	V_f (V_f%)	ρ (g/cm^3)
Tip 1	50,84	38,87	1,2911
Tip 2	31,99	24,47	1.302
Tip 3	56,29	43,04	1.295
Tip 4	32,26	24,50	1.301

Tablo 3.17 : Ağırlık/Hacim Oranları

3.5.4.Çekme Test Sonuçları :

Statik çekme testleri ASTM D-3039 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.23, Tablo 3.24, Tablo 3.25 ve Tablo 3.26'da iki farklı tür ve her türden iki farklı tabakalarda (5L & 9L) 4 tip kompozit malzeme için statik çekme test sonuçları verilmiştir. Tablolar incelendiğinde, en yüksek çekme dayanım ve elastik modül değerleri Tip 3 kompozit malzemede görülmüştür.

Parametre	Kuvvet	Elastik Modul	Uzama	Kopma Dayanım	Kalınlık	Genişlik
Unit	**N**	**MPa**	**%**	**MPa**	**mm**	**Mm**
1_1	26780,91	24536,84	2,45	337,44	3,20	14,97
1_2	25993,06	25250,66	2,55	329,84	3,28	14,92
1_3	26317,04	25670,90	2,51	324,37	3,07	14,96
1_4	25694,80	24990,99	2,52	324,92	2,95	14,99
1_5	25270,83	25111,31	2,30	315,40	3,24	15,03
Ort	**26011,33**	**25112,14**	**2,47**	**326,40**	**3,15**	**14,97**
Std. Dev.	516,64	367,98	0,09	7,23	0,12	0,04
CoV(%)	1,99	1,47	3,61	2,21	3,86	0,24

Tablo 3.18 : Tip 1 Çekme Test Sonuçları

Parametre	Kuvvet	Elastik Modul	Uzama	Kopma Dayanım	Kalınlık	Genişlik
Unit	**N**	**MPa**	**%**	**MPa**	**mm**	**Mm**
3_1	28077,90	24974,49	3,02	343,38	3,17	14,95
3_2	30009,05	24818,29	2,95	352,73	3,05	14,98
3_3	31012,68	25800,08	3,10	366,84	3,12	14,91
3_4	29284,81	26226,67	2,88	348,74	3,17	15,00
3_5	29774,57	26002,25	2,90	364,44	3,08	15,03
Ort	**29631,80**	**25564,36**	**2,97**	**355,23**	**3,12**	**14,97**
Std. Dev.	959,64	564,01	0,08	9,04	0,05	0,04
CoV(%)	3,24	2,21	2,74	2,54	1,54	0,28

Tablo 3.19 : Tip 3 Çekme Test Sonuçları

Parametre	Kuvvet	Elastik Modul	Uzama	Kopma Dayanım	Kalınlık	Genişlik
Unit	**N**	**MPa**	**%**	**MPa**	**mm**	**Mm**
4_1	17043,55	14123,82	2,40	204,30	2,85	14,98
4_2	17085,60	14738,47	2,45	203,80	2,86	14,99
4_3	16001,04	14566,61	2,32	195,13	2,87	14,92
4_4	16526,40	14845,46	2,34	204,66	2,88	15,02
4_5	16879,71	14636,25	2,37	200,02	2,88	15,03
Ort	**16707,26**	**14582,12**	**2,38**	**201,58**	**2,87**	**14,99**
Std. Dev.	404,33	247,79	0,05	3,63	0,01	0,04
CoV(%)	2,42	1,70	1,93	1,80	0,41	0,26

Tablo 3.20 : Tip 4 Çekme Test Sonuçları

Parametre	Kuvvet	Elastik Modul	Uzama	Kopma Dayanım	Kalınlık	Genişlik
Unit	**N**	**MPa**	**%**	**MPa**	**mm**	**Mm**
2_1	13526,34	13586,95	2,21	183,93	2,85	14,98
2_2	13356,61	12720,95	2,22	171,89	2,8	14,99
2_3	13874,80	13392,44	2,24	187,58	2,87	14,92
2_4	13301,85	13142,02	2,26	173,16	2,88	15,02
2_5	13908,20	13166,27	2,28	182,15	2,88	15,03
Ort	**13593,56**	**13201,73**	**2,24**	**179,74**	**2,86**	**14,99**
Std. Dev.	254,50	290,08	0,03	6,16	0,03	0,04
CoV(%)	1,87	2,20	1,14	3,43	1,05	0,26

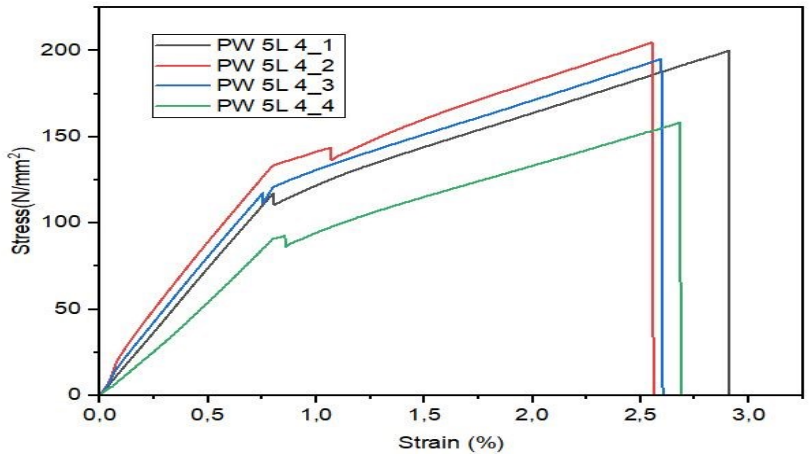
Tablo 3.21 : Tip 2 Çekme Test Sonuçları

3.6. Mekanik Test Grafik Sonuçları

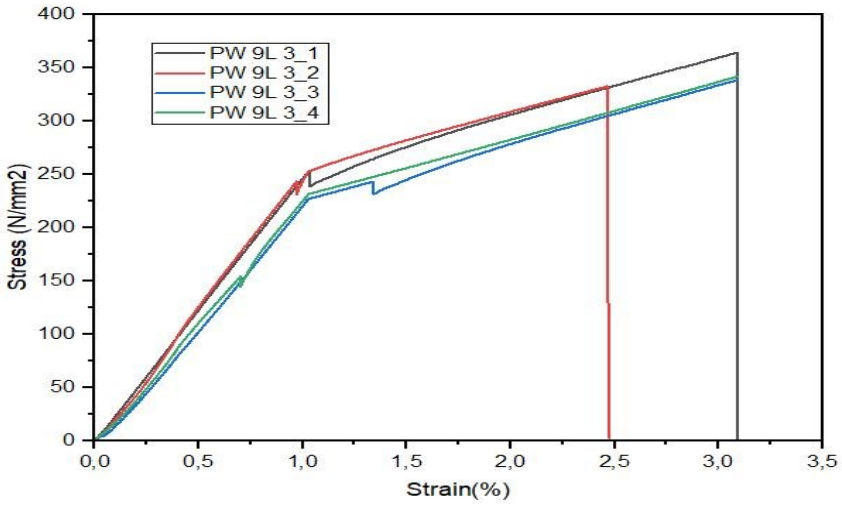
Mekanik test verilerinin grafik sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.Veriler test ekipmanlarından elde edilmiştir.

3.6.1 Çekme Testi Grafik Sonuçları:

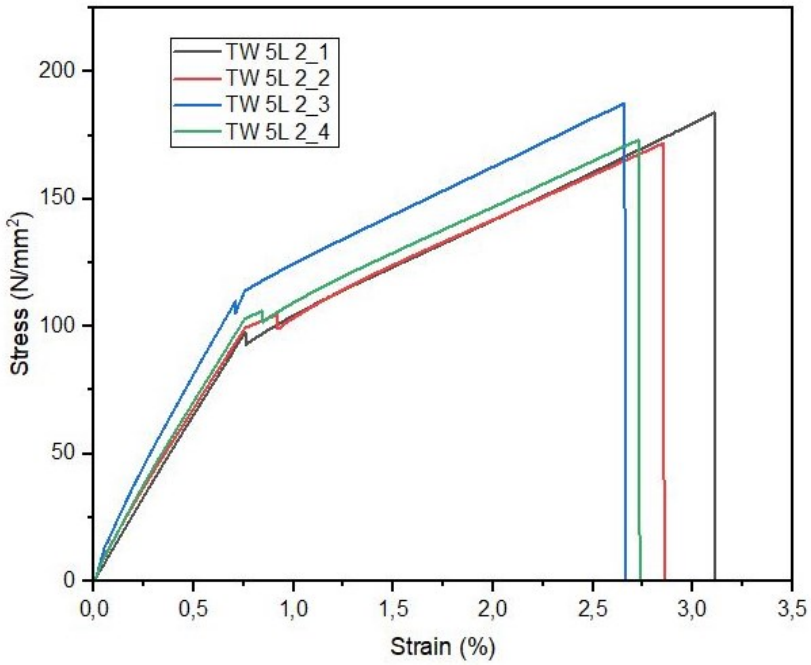
ASTM D 3039 standardına göre 4 tip kompozit malzemeler için gerçekleştirilen statik çekme test verilerinden elde edilen değerlerden oluşturulan gerilim/gerinim (uzama) grafikleri Şekil 3.26, Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29 da verilmiştir. Her bir tip kompozit malzeme için dört deney yapılmış ve bu deneylerin grafikleri tek bir grafik gibi gösterilmiştir. Böylece yapılan deneylerin de güvenilirliği ve tutarlılığı kontrol edilmiştir. Tüm tipler için oluşturulan gerilim/gerinim (uzama) grafikleri incelendiğinde elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.



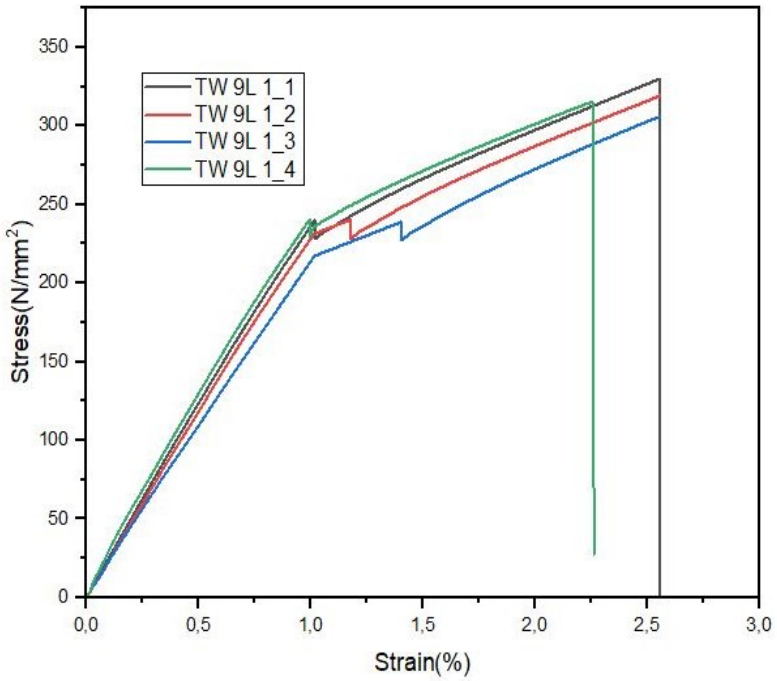
Şekil 3.26: Tip 4 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri



Şekil 3.27: Tip 3 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri



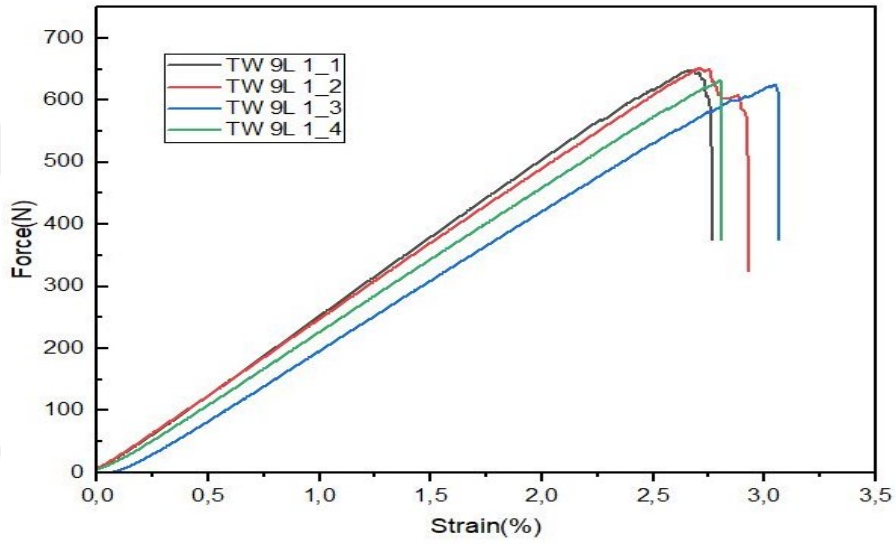
Şekil 3.28: Tip 2 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri



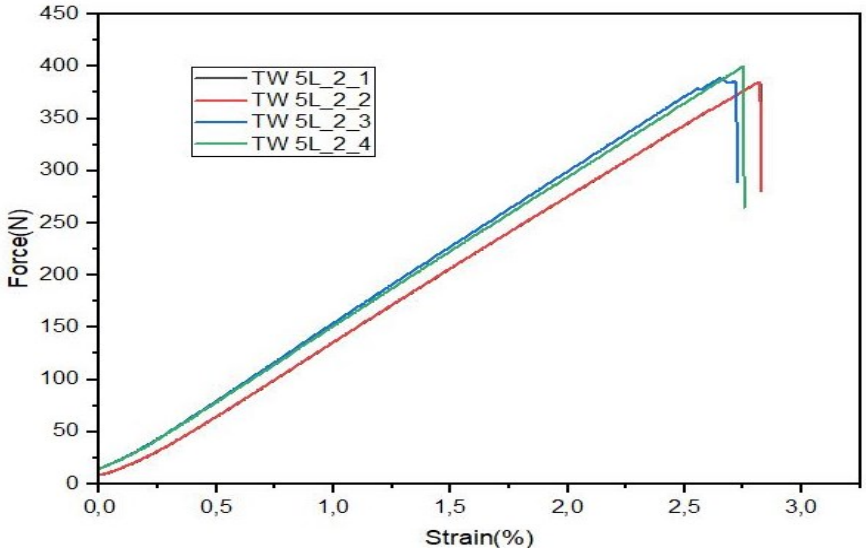
Şekil 3.29: Tip 1 Çekme Testi Gerilim/Gerinim (Uzama) Grafikleri

3.6.2 3 Nokta Eğme Testi Grafik Sonuçları

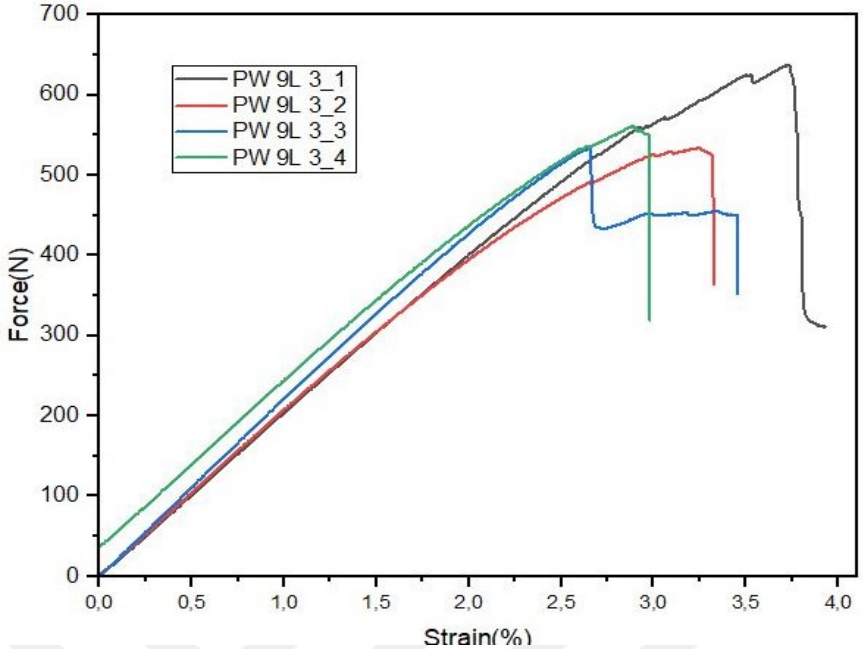
EN:ISO 14125 standardına göre 4 tip kompozit malzemeler için gerçekleştirilen 3 nokta eğme test verilerinden elde edilen değerlerden oluşturulan kuvvet/gerinim (uzama) grafikleri Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33' de verilmiştir. Her bir tip kompozit malzeme için dört deney yapılmış ve bu deneylerin grafikleri tek bir grafik gibi gösterilmiştir. Böylece yapılan deneylerin de güvenilirliği ve tutarlılığı kontrol edilmiştir. Tüm tipler için oluşturulan gerilim/gerinim (uzama) grafikleri incelendiğinde elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.



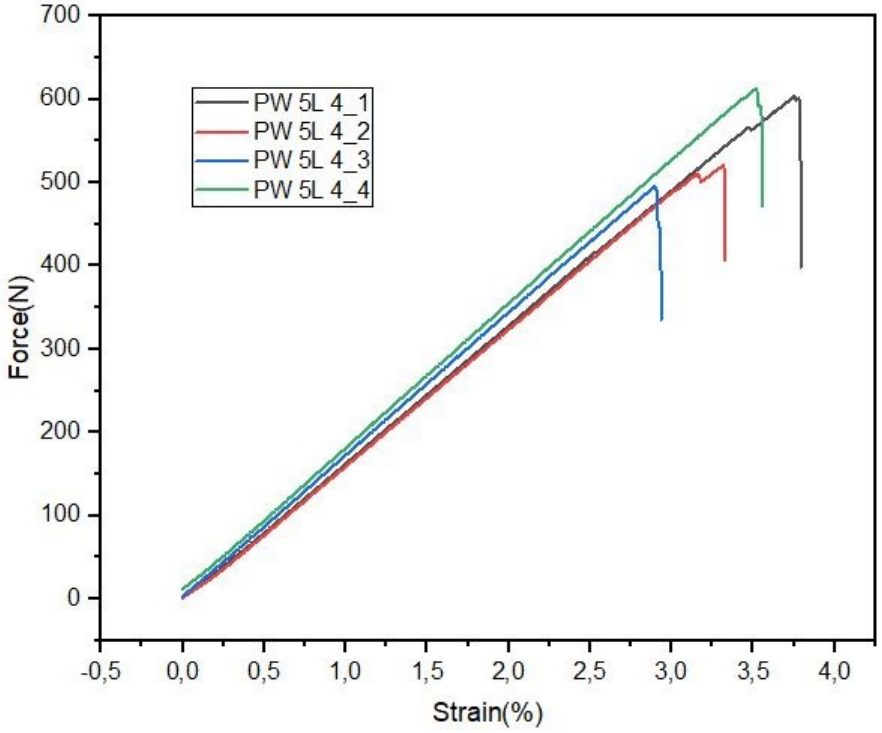
Şekil 3.30: Tip 1 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafik



Şekil 3.31: Tip 2 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri



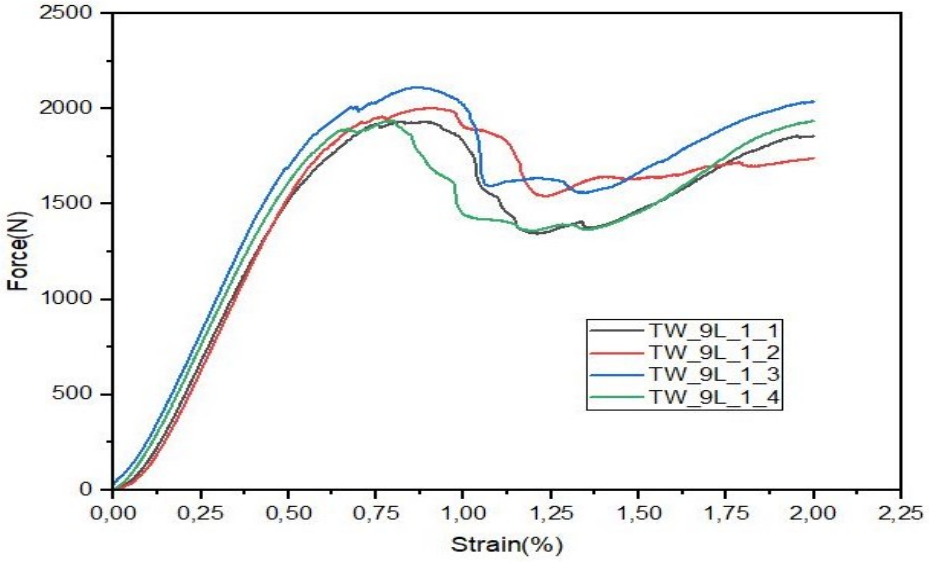
Şekil 3.32: Tip 3 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri



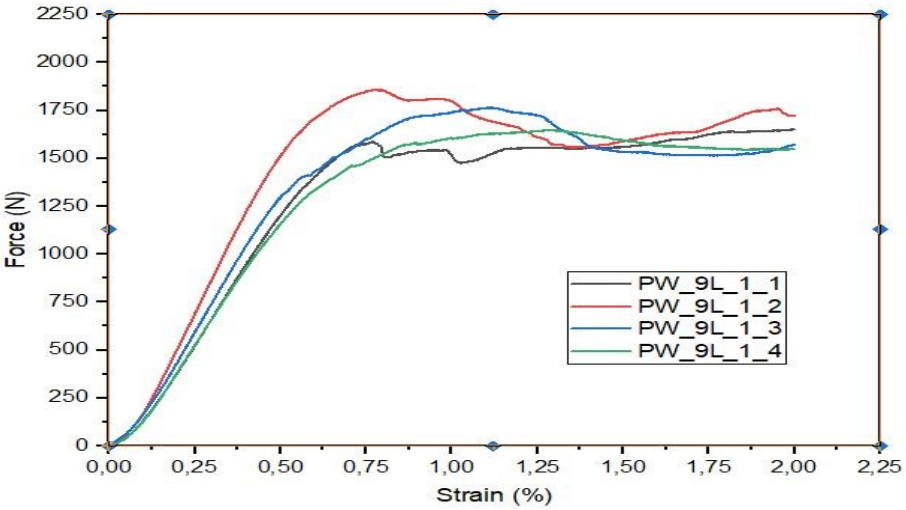
Şekil 3.33: Tip 4 3 Nokta Eğme Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri

3.6.3. Tabakalar Arası Kayma (ILSS)Test Grafik Sonuçları:

ASTM D-2344 standardına göre 2 tip (tip 1 ve tip 3) kompozit malzemeler için gerçekleştirilen tabakalar arası kayma test verilerinden elde edilen değerlerden oluşturulan kuvvet/gerinim (uzama) grafikleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilmiştir. Her bir tip kompozit malzeme için dört deney yapılmış ve bu deneylerin grafikleri tek bir grafik gibi gösterilmiştir. Böylece yapılan deneylerin de güvenilirliği ve tutarlılığı kontrol edilmiştir. Tüm tipler için oluşturulan gerilim/gerinim (uzama) grafikleri incelendiğinde elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir



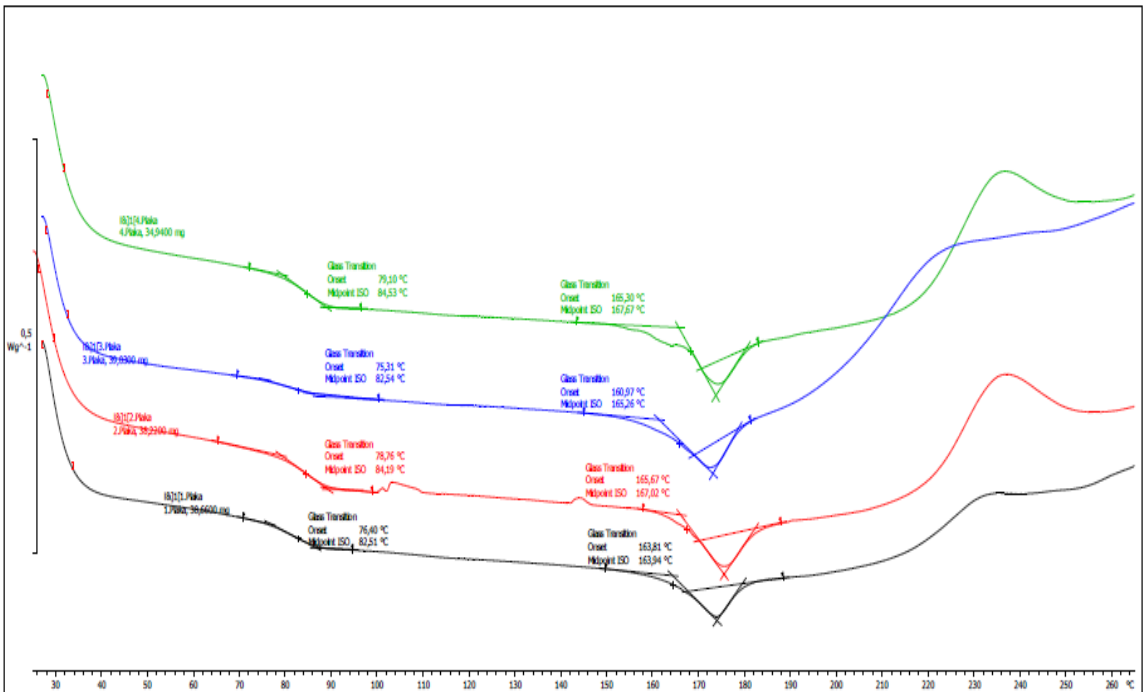
Şekil 3.34: Tip 1 ILSS Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri



Şekil 3.35: Tip 3 ILSS Testi Kuvvet/Gerinim (Uzama) Grafikleri

3.7.Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testi:

Üretilen 4 tip plakaya ait DSC çıktıları malzemenin mekanik özelliklerinin dışında termal camsı geçiş özelliklerini ve polipropilen takviyenin ısı geçişlerini görmemizi sağlamak için yapılmıştır.Camsı geçiş sıcaklığı (Tg) polimerik malzemelerin temel ayırt edici özelliklerinden birisidir. Maddenin camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı sıcaklık sınırıdır. Erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür. . Şekil 3.36 ve Tablo 3.26' da dört tip kompozit malzeme DSC sonuç grafikleri ve değerleri verilmiş olup, grafikler ve tablo değerleri incelendiğinde Tg değerlerinin neredeyse eşit çıktığı görülmüştür. Bu bağlamda test sonuçlarının ve kompozit malzemelerin üretiminin güvenilir ve tutarlı olduğu görülmektedir.



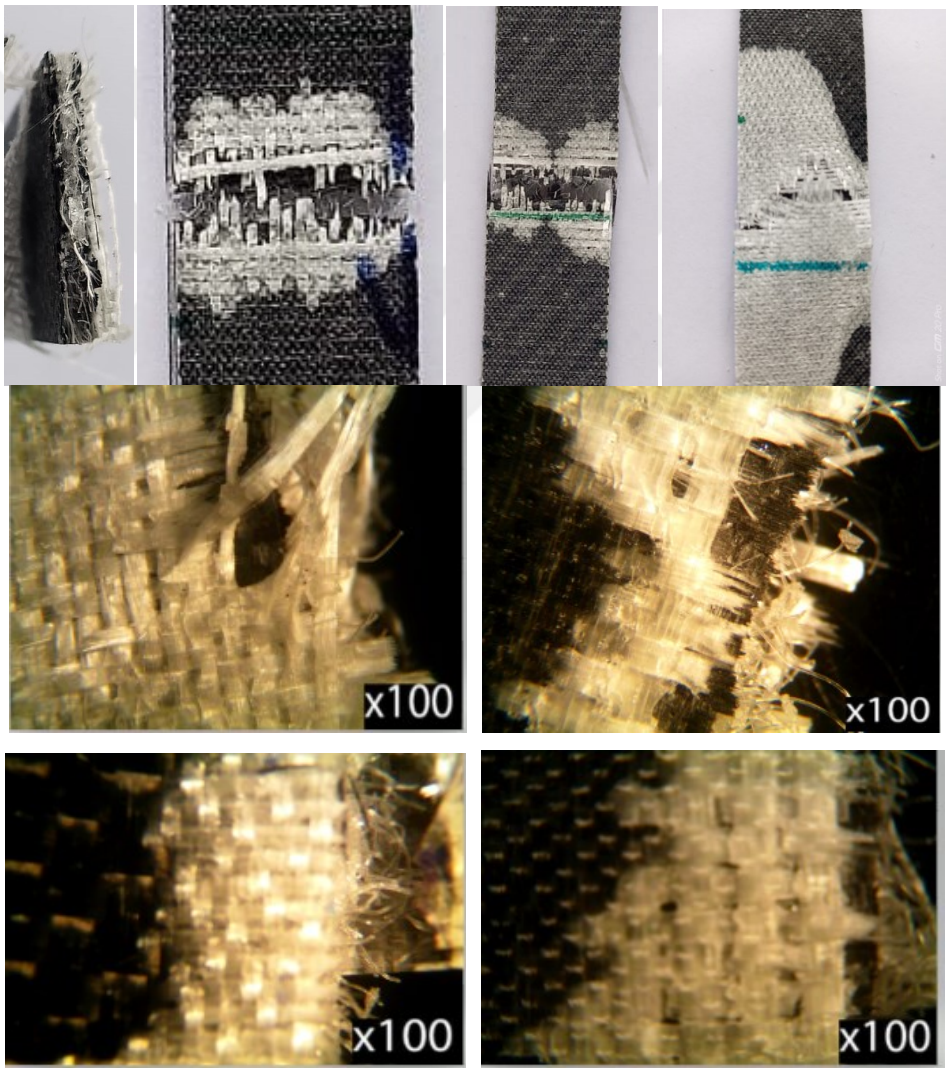
Şekil 3.36: Dört Tip Kompozit Malzeme DSC Sonuç Grafikleri

	Numune Ağırlık (mg)	Tg Plaka(C°)	Tg Reçine(C°)
Tip 1	38,66	167,67	82,51
Tip 2	38,22	165,26	84,19
Tip 3	39,030	167,02	82,54
Tip 4	34,9400	163,94	84,53

Tablo 3.22. DSC Camsı Geçiş Sıcaklıkları

3.8. Hasar Analizi:

Çekme testlerinden sonra, kompozit malzemelerin hasar mekanizmalarının anlaşılması için hasarlı numuneler incelendi. Sonuç olarak, tüm kompozit malzeme sistemlerinde gevrek fiber kırılması ve kırılgan matris çatlakları gözlemlenmiştir. Çekme testleri sırasında 70 adet test numunesi test edilmiştir. Birçok test numunesi olduğu için bunlardan sadece biri bu makalede örnek olarak sunulmuştur. Gevrek fiber kırılması ve matris çatlakları, fiber ayrılması tüm kompozit laminat tiplerinde meydana gelmiştir. Çekme testleri sonrası kırılan veya zarar gören yakınlaştırılmış dijital numune görüntüleri Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



Şekil 3.37 : Çekme testlerinden sonra hasara uğramış numunelerin yakınlaştırılmış dijital fotoğrafları

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

- Yapılan deney setleri ve analiz sonucunda hibritleşme mantığı tabakalı hibritleşme seviyesinde başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Çıktılar sadece tabakalı seviyede değil, mikro yapıda da gözlemlenmiştir. Tabaka anlayışı lamina ve laminat seviyelerinde analizlerle net bir şekilde ifade edilmiştir.
- Fiziksel deney setlerinin oluşturulmasında gerekli iş sağlığı güvenliği ekipmanları kullanılmış kumaş takviyeleri ve KÇA alanı önceden tasarlanmıştır.Üretim sonrası geri dönüştürülemez atıklar yönetmeliklere uygun bir şekilde atılmıştır.
- Plakalar eşdeğer şekilde belirtilen standartlara uygun olarak numune haline getirilmiş,ve test standartları eksiksiz bir şekilde uygulanmıştır.Test mekanik sonuçlarının doğruluğu bu yolla sağlanmıştır.
- Hasar teorileri geniş bir perspektif ve üretilen yenilikçi ürünün sonraki kullanım alanlarda açıklayıcı mekanik çıktılar oluşturması için analiz edilmiştir. Genel perspektif ve malzeme tanımı çalışmanın başındaki Polipropilen takviye kullanımı ve hibritleşme üzerindeki etkilerini açıklar hale getirmiştir.
- Ön tasarım için yapılan RVE sonucuna göre takviye yapıların ayrı ayrı laminant değerleri elastik modul için 7,7342E+09 Pa ile 2,3022E+09 Pa arasındadır,Kayma modulu 1.1086E+10 Pa ile 8,8163E+08 Pa arasındadır.Poisson oranları 0,7153 ile 0,39049 arasında değişmektedir.Tüm takviye elemanları için ön RVE fiber hacim oranları %55'tir.Polipropilen takivye yapısındaki boşluklar sebebi ile hibrit etkisi gözlemlenmiştir.
- Ansys ACP modulunde üretilen plaka boyutlarında tabakalı hale getirilen plakanın laminant eğme kayma değeri 2246.36 MPa laminant kayma uzama değeri 2140.42 MPa ve kayma düzeltme faktörü 0,44 ve 0,45 arası hesaplanmıştır. Numune bazında enine ve boyuna yükleme durumları için yakın değerler elde edilmiştir.
- Ön tasarım plakasında polar koordinat sonuçlarında dokumasız polipropilen kumaş yönsüz etki göstermiştir.Cam ve karbon takviyeler dokuma kumaş yönlemeleri göstermektedir.
- Statik Analiz kısmında 4 noktadan sabitlenen ve ortaya noktaya uygulanan ön gerilme davranış cevap oranı 6/1 elde edilmiştir.Hasar kriterleri normal seviyelerde kontur göstermiştir.

- Ön tasarım Ansys ACP modulunde elde edilen matris detaylarında B matrislerde 2.8 de anlatılan klasik laminasyon teorisine uygun olarak 0 değerinde elde edilmiştir. Ön gerilme sonrası matris değerileri benzer şekilde B matrisini sıfırlayacak şekilde elde edilmiştir.Bu durum mevcut hibritlşeme istif dizilimi takviye ve matris seçiminin doğru olduğunu göstermektedir.
- Ön gerilme sonrası Ansys Post modulunde istif dizilimi ve stress dağılımları hibritleşmenin etkisini göstermektedir.
- Post süreçte incelenen plaka davranışlarında çekme ve basma yükleri orta tabaka etkisini azaltacak şekilde katmanlarda kendini göstermektedir. 5 . tabakada bulunan polipropilen keçe düşük özelliklerine rağmen hibritleşmenin pozitif etkisini açık bir şekilde doğrulamaktadır.
- Post süreci katman davranışlarında katmanlar hasar teorilerinin efektif şekilde çalıştığının göstermektedir.Şekil 3.13 ten 3.21 e kadar olan post resimler stress dağılımlarını değil bölüm 2.12 de anlatılan hasar teori formullerini belirtir.Post laminant resimleri hibritleşmenin doğru etkisini göstermektedir.
- Post süreç te elde edilen analiz çıktıları şekil 2.16 da anlatılan hata oranları cevap oranlarınıda karşılamıştır.
- Tüm analiz süreçleri ile beklenen hedef değerler ön tasarım çıktısı olarak elde edilmiştir.Deney setlerindeki istifleme diziliminin doğruluğu ve kullanılanılan polipropilen takviyenin mekanik özelliklerde maliyet azaltıcı etkisi gözlemlenmiştir.
- Mekanik test sonuçlarında 3 nokta eğme testi değerlerinde Tw 9 kat karbon deseni %11-15 civarında daha iyi eğilme davranışına sebep olmuştur.ILSS tabakalar arası kayma durumunda Tw 9L %30 -33 ortalama daha iyi değer göstermiştir.Orta tabakadaki polipropilen tokluk değerlerinde homojen olarak %15 daha iyi değer mekanik özellikler sağlamıştır.
- Ön tasarımda oluşturulan plaka testlerde yapılan standartlara uygun olarak 3 Nokta Eğme testine tabi tutulmuştur.Modelleme sonucunda ön tasarımda oluşturulan plakanın 3 nokta eğme mekanik değerleri Pw ve Tw karbon takviye değerlerinin arasında bulunmaktadır. Ön tasarım analiz modellemesi üretim yöntemi ve fiber oranlarından bağımsız olarak doğru sonuca işaret etmektedir.
- Fiber ağırlık oranları Pw tipi kumaşalar için %12 daha fazla değer sağlarken yoğunluk oranları birbirine yakın olarak 4 tip için yaklaşık 1,30 g/cm^3

değerindedir.Fiber ağırlık ve hacim oranları tabakalı hibrit kompozit oranlarını sağlamaktadır.Polipropilenin tokluk artıcı etkisi bu oranlarda açıkça gözlemlenmektedir.

- DSC cihazında oluşturulan 4 tabaka için ayrı ayrı potlarda camsı geçiş sıcaklığı değerleri elde edilmiştir.Değerler polipropilen takviyenin ve reçinenin kristalleşme sıcaklıklarını gösterir
- Mikroskop görüntülerinde karbon,cam ve polipropilen takviye plastik defarmasyon sonrası ayrı ayrı gözlemlenmiştir.
- Beklendiği gibi tüm tip kompozit malzeme türlerinde gevrek fiber kırılması ve kırılgan matris çatlakları gözlenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] Taş, H. & Soykök, İ. F. (2018). Tabakalı Hibrit Kompozit Profillerin Doğal Frekanslarının Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi . Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi , 20 (60) , 1045-1056 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/42696/514827

[2] Monjon, A.; Santos, P.; Valvez, S.; Reis, P.N.B. Hybridization Effects on Bending and Interlaminar Shear Strength of Composite Laminates. Materials 2022, 15, 1302. https://doi.org/10.3390/ma15041302

[3] 1.Ebrahimnezhad-Khaljiri H, Eslami-Farsani R, Akbarzadeh E. Effect of interlayer hybridization of carbon, Kevlar, and glass fibers with oxidized polyacrylonitrile fibers on the mechanical behaviors of hybrid composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020;234(9):1823-1835. https://doi:10.1177/0954406219897935

[4] Öndürücü, A. & Can, G. (2020). Fonksiyonellendirilmiş Alümina ve Silika Katkılı Kevlar-Cam Elyaf/Epoksi Reçineli Hibrit Kompozitlerin Cam ve Kevlar Yüzeylerine Uygulanan Darbe Enerjilerinin Darbe Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi . Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , 24 (3) , 707-717 . DOI: 10.19113/sdufenbed.638388

[5] Kumar, Praveen & Lazar, Prince Jeya lal & Kumar, Barani. (2012). Hybridization of Polymer Composites. Research India Publications. 3. 173-182.

[6] Karacor, B. & Özcanlı, M. (2022). The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites . Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 11 (2) , 439-448 . DOI: 10.28948/ngumuh.1080540

[7] Prashanth, M., Gouda, P. S. S., Manjunatha, T. S., Banapurmath, N. R., Edacheriane, A., PolymCompos. 2021, 42(10), 5475. https://doi.org/10.1002/pc.26239

[8] Nega, B.F., Pierce, R.S., Yi, X. *et al.* Characterization of Mechanical and Damping Properties of Carbon/Jute Fibre Hybrid SMC Composites. *Appl Compos Mater* 29, 1637–1651 (2022). https://doi.org/10.1007/s10443-022-10034-3

[9] Woo-Kyun Jung, Beomkeun Kim, Myung-Shik Won, Sung-Hoon Ahn,

Fabrication of radar absorbing structure (RAS) using GFR-nano composite and spring-back compensation of hybrid composite RAS shells,Composite Structures, ISSN 0263-8223, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.077

[10] Aydın, M. R. , Acar, V. , Yapıcı, F. , Yıldız, K. , Topcu, M. V. & Gündoğdu, Ö. (2018). Inter-ply Hibrit Kompozit Yapılarda Elyaf Diziliş Sıralamasının Mekanik ve Dinamik Özelliklere Etkisi . Journal of the Institute of Science and Technology , 8 (3) , 255-263 . DOI: 10.21597/jist.458649

[11] Yentl Swolfs, Larissa Gorbatikh, Ignaas Verpoest,Fibre hybridisation in polymer composites: A review,Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,Volume 67,2014,Pages 181-200,ISSN1359835X, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027.

[12] Sayer, M. & Bektaş, N. B. (2009). Darbe Yükü Altındaki Hibrit Kompozit Plakalara Sıcaklığın Etkisi . Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 15 (3) , 337-343 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/20512/218378

[13] Zeno Michael, Irfan Mahisham, Muhammad Farid Mahadi, Asyraf Naim Mohd Amin, Syed Irsyad Hilmi Syed Ahmad, Jamaluddin Mahmud,
Deformation and failure behavior of hybrid composite laminates made of Glass Epoxy and woven Kevlar Epoxy,Materials Today: Proceedings,Volume 46, Part 4,2021,Pages 1618-1625,ISSN 2214-7853,https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.253.

[14] A. Benyahia, A. Benammar and A. Guessoum, "Delamination Defects Localization in Carbon Fiber Composite Laminates Using Ultrasonic Signal Processing," *2020 6th International Symposium on New and Renewable Energy (SIENR)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIENR50924.2021.9631914.

[15] Alpa Tapan Bhatt *et al* 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 330 012107

[16] Asim, Mohammad & Jawaid, Mohammad & Saba, Naheed & Siakeng, Ramengmawii & Nasir, Mohammed & Sultan, Mohamed. (2017). Processing of hybrid polymer composites—a review. 10.1016/B978-0-08-100789-1.00001-0.

[17] Joo, YS., Kim, MS. Fatigue Life Prediction of Composite Laminate Based on Stress of Fiber and Matrix of UD Composite. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 23, 277–287 (2022). https://doi.org/10.1007/s42405-021-00434-3

[18] www.gurit.com/Guide to composite

[19] https://adapamoulds.com/composites/

[20] https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites

[21] https://adapamoulds.com/portfolio-item/adaptive-mould-d300/

[22] https://www.toraycma.com/applications/composites-automation/

[23] Selver, E. (2019). Acoustic Properties of Hybrid Glass/Flax and Glass/Jute Composites Consisting of Different Stacking Sequences . Tekstil ve Mühendis , 26 (113) , 42-51 . Retrieved from https://dergipark.org.tr/en/pub/teksmuh/issue/44339/548056 https://www.academia.edu/42320956/Handbook_of_textile_design_principles_processes_and_practice

[24] https://www.scribd.com/book/282653062/Handbook-of-Textile-Design

[25] Woodhead Publishing in Textiles, Editor(s): S.J. Eichhorn, J.W.S. Hearle, M. Jaffe, T. Kikutani, In Woodhead Publishing Series in Textiles, Handbook of Textile Fibre Structure,Woodhead Publishing, Volume 1, 2009,Pages 20-30, ISBN 9781845693800, https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-380-0.50023-0

[26] M. GuruRaja and A. HariRao, "Influence of Angle Ply Orientation on Tensile Properties of Carbon/Glass Hybrid Composite," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 1 No. 5, 2013, pp. 231-235. doi: 10.4236/jmmce.2013.15036.

[27] Shubhra QT, Alam A, Quaiyyum M. Mechanical properties of polypropylene composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2013;26(3):362-391. doi:10.1177/0892705711428659

[28] Chloe McDonnell, Steven Hayes, Prasad Potluri, Investigation into the tensile properties of ISO-401 double-thread chain-stitched glass-fibre composites, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Volume 4, Issue 2, 2021, Pages 203-209, ISSN 2588-8404, https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.11.001.

[29] https://www.textileschool.com/123/plain-weaves/"

[30] Karthik Ram Ramakrishnan, Mikko Kanerva, Essi Sarlin, Mikko Hokka, Impact damage resistance of novel adhesively bonded natural fibre composite – Steel hybrid laminates,International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Volume 5, Issue 1,2022,Pages 29-43,ISSN 2588-8404, https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.10.001.

[31] Dongdong Chen, Guangyong Sun, Maozhou Meng, Xihong Jin, Qing Li, Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates,Thin-Walled Structures,Volume 142,2019,Pages 516-531,ISSN 0263-8231,

[32] M Shah and V Chaudhary 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 872 012087 DOI 10.1088/1757-899X/872/1/012087

[33] K.P Arjun, S. de Barros, S. Budhe, Theoretical determination of elastic and flexural modulus for inter-ply and intra-ply hybrid composite material,Composite Structures,Volume 281,2022,114971,ISSN 0263-8223, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114971.

[34] Koruche, S., & Patil, F. (2015). Application of Classical Lamination Theory and Analytical Modeling of Laminates.

[35] Bertan Beylergil,Multi-objective optimal design of hybrid composite laminates under eccentric loading,Alexandria Engineering Journal,Volume 59, Issue 6,2020,Pages 4969-4983,ISSN 1110-0168, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.015.

[36] Francisco M. Monticeli, José Humberto S. Almeida Jr, Roberta M. Neves, FelipeG. Ornaghi, Heitor L. Ornaghi,On the 3D void formation of hybrid carbon/glass fiber composite laminates: A statistical approach,Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,Volume 137,2020,106036,ISSN 1359-835X, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106036.

[37] Venkata Sushma Chinta, P. Ravinder Reddy $_2$ Koorapati Eshwara Prasad; Experimental and FE Analysis of Tensile and Bending Properties of Glass/Jute Epoxy Hybrid Composite ISSN: 2319-6319

[38]https://help.solidworks.com/2018/english/solidworks/cworks/c_composite_failure_criteria.htm

[39] Huebner, Kenneth H. (2001). The Finite Element Method for Engineers. Wiley.Page 30-40 ISBN 978-0-471-37078-9.

[40] Hill (1963),Drugan and Willis (1996)

[41] Witold Ogierman, Grzegorz Kokot, Generation of the representative volume elements of composite materials with misaligned inclusions,Composite Structures,Volume 201,2018,Pages 636-646,ISSN 0263-8223,

[42] Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman,

Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer,Procedia Structural Integrity,Volume 28,2020,Pages 1892-1900,ISSN 2452-3216,https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.012.

[43] https://www.ansys.com/de-de/blog/how-to-simulate-microstructures-composites

[44] M. Gayatri Vineela, Abhishek Dave, Phaneendra Kiran Chaganti, Artificial Neural Network based Prediction of Tensile Strength of Hybrid Composites, Materials Today: Proceedings,Volume 5, Issue 9, Part 3,2018,Pages 19908-19915, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.356.

[45]https://www.researchgate.net/publication/332766462_Ansys_Tutorial_for_ACP_Full_composite_tutorial_in_ANSYS

[46] Quanjin, M., Merzuki, M., Rejab, M., M.S.M. Sani, & Bo Zhang. (2022). Numerical Investigation on Free Vibration Analysis of Kevlar/Glass/Epoxy Resin Hybrid Composite Laminates. *Malaysian Journal on Composites Science &Amp; Manufacturing*, *9*(1), 11–21. https://doi.org/10.37934/mjcsm.9.1.1121

[47] **‘**Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates’ ıx/x, 62, a-6, b-55 p.: ıll.; unıted states. purdue unıversıty. galaxy scıentıfic corporatıon. cover tıtle. prepared by purdue unıversıty, school of aeronautıcs and astronautıcs ın cooperatıon wıth galaxy scıentıfic corporatıon. "may 1996." fınal report.

[48] Quanjin, M., Merzuki, M., Rejab, M., M.S.M. Sani, & Bo Zhang. (2022). Numerical Investigation on Free Vibration Analysis of Kevlar/Glass/Epoxy Resin Hybrid Composite Laminates. *Malaysian Journal on Composites Science &Amp; Manufacturing*, *9*(1), 11–21. https://doi.org/10.37934/mjcsm.9.1.1121

[49] Gül,Müberra ‘Dikdortgen Kompozit Plakların Sonlu Elemanlar Yontemiyle Statik Analizi’Gazi Üniversitesi,2011

[50] Özakıncı Mehmet ‘Tabakalı Kompozit Plakaların Titreşim Analizi’İstanbul Teknik Üniversitesi,2006

[51] Chensong Dong,Flexural properties of symmetric carbon and glass fibre reinforced hybrid composite laminates,Composites Part C: Open Access,Volume 3,2020, 100047,ISSN 2666-6820, https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100047.

[52] https://www.nal.res.in/en/techniques/resin-transfer-moulding-processes

[53] Beşergil Bilsen,’**Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları’** 3.Basım, Ankara: Gazi, 2016, s.418-421**.**