T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

POLİPROPİLEN MATRİSLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM KONSOLİDASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Hazırlayan
Abdullah SAAR

Danışman
Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK
2.Danışman
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN

Yüksek Lisans Tezi

Mart 2025
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

POLİPROPİLEN MATRİSLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM KONSOLİDASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Abdullah SAAR

Danışman
Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK
2. Danışman
Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN

Mart 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Abdullah SAAR

İmza

“Polipropilen Matrisli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Üretim Konsolidasyon Parametrelerinin Belirlenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Abdullah SAAR
İmza

Danışman
Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK

Makine Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. S. Orhan AKANSU
İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda yol gösteren; yardımları, katkıları, bilgisi, ilgisi, desteği ve deneyimlerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda kişisel gelişimimde de büyük rol oynayan, her zaman sabırla dinleyen, yapıcı önerileriyle yolumu aydınlatan ve karşılaştığım her zorlukta desteğini hissettiren ikinci danışman hocam Doç. Dr. Umut ÇALIŞKAN'a özel bir teşekkürü borç bilirim. Kendisi, gerek bilgi birikimi gerekse rehberliği ile hem bu tezin ortaya çıkmasında hem de yüksek lisans yolculuğumun verimli şekilde ilerlemesinde çok değerli bir yere sahiptir. Yüksek lisans eğitimime katkılarıyla destek veren başta bölüm başkanımız Prof. Dr. S. Orhan AKANSU olmak üzere, tüm Anabilim Dalı hocalarıma teşekkür ederim.

Parçaların üretimi aşamasında benimle birlikte büyük bir özveriyle çalışan arkadaşım Cihan BEZEN'e teşekkür ederim.

Bu zamana kadar iyi şekilde yetişmemi sağlayan ve her zaman yanımda olan canım annem Hatice SAAR ve canım babam Ali SAAR'a, her koşulda desteğini hissettiğim ablam Sinem SAAR ve kardeşim Arif Samet SAAR'a, uzun ve zorlu bir süreçte sabır ve sevgisiyle yanımda olan kıymetli eşim Havva SAAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah SAAR

Ocak 2025, KAYSERİ

POLİPROPİLEN MATRİSLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM KONSOLİDASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Abdullah SAAR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mart 2025
Danışman: Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK

ÖZET

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, son yıllarda endüstride önemli bir yer edinmiştir. Bu malzemeler, farklı mühendislik uygulamalarında kullanılan geleneksel malzemelerin sınırlamalarını aşmak ve daha üstün özelliklere sahip yapılar elde etmek hedefiyle geliştirilmiştir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, iki temel bileşenden oluşur: polimer matris ve güçlendirici fiberler. Bu fiberler genellikle karbon, cam, aramid veya bazalt gibi malzemelerden oluşur. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık, korozyona dayanıklılık, yüksek sertlik ve iyi termal özellikler gibi avantajlara sahiptir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, daha verimli, dayanıklı ve sürdürülebilir yapılar ve ürünlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki üretim parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Üretim süreçlerinde basınç (10, 20, 30 bar) ve basınç uygulama süresi (5, 10, 20 dak.) gibi değişkenler, malzeme özelliklerini optimize etmek amacıyla değerlendirilmiştir. Numuneler, kademeli kalıp kullanılarak hazırlanmış ve farklı parametrelerle sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Malzemelerin eğilme dayanımları, üç nokta eğme testleri ile analiz edilmiş, termal davranışları ise Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) yöntemiyle incelenmiştir. Çalışma sonuçları, basınç ve süre değişkenlerinin malzeme homojenliği, lif-matris bağlanması ve boşluk oluşumu üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu araştırma, GFR-PP kompozitlerin üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik bilimsel bir temel sağlamakta ve malzemelerin havacılık ve diğer mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Termoplastik kompozit**,** Cam elyaf, polipropilen, konsolidasyon, karakterizasyon

DETERMINATION OF PRODUCTION CONSOLIDATION PARAMETERS OF GLASS FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES WITH POLYPROPYLENE MATRIX

Abdullah SAAR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, March 2025
Supervisor: Prof. Dr. Zeynep Gül APALAK

ABSTRACT

Fiber reinforced composite materials have gained an important place in the industry in recent years. These materials have been developed to overcome the limitations of traditional materials used in different engineering applications and to obtain structures with superior properties. Fiber-reinforced composite materials consist of two basic components: a polymer matrix and reinforcing fibers. These fibers are usually composed of materials such as carbon, glass, aramid or basalt. Fiber-reinforced composite materials have advantages such as high strength, low weight, corrosion resistance, high stiffness and good thermal properties. Fiber reinforced composite materials contribute to the development of more efficient, durable and sustainable structures and products.

In this study, the effects of manufacturing parameters on the mechanical and thermal properties of glass fiber reinforced polypropylene (GFR-PP) composites were investigated. Variables such as pressure (10, 20, 30 bar) and pressure application time (5, 10, 20 min) were evaluated to optimize the material properties. The specimens were prepared using a staggered mold and subjected to hot pressing with different parameters. The flexural strength of the materials was analyzed by three-point bending tests, and their thermal behavior was investigated by Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results of the study revealed that pressure and time variables have an effect on material homogeneity, fiber-matrix bonding and void formation. This research provides a scientific basis for improving the manufacturing processes of GFR-PP composites and demonstrates the potential of the materials in aerospace and other engineering applications.

Keywords: Thermoplastic composite, Glass fiber, Polypropylene, consolidation, characterization

İÇİNDEKİLER

POLİPROPİLEN MATRİSLİ CAM ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÜRETİM KONSOLİDASYON PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR xi
TABLOLAR LİSTESİ xii
ŞEKİLLER LİSTESİ xiii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemeler 4
1.1.1. Kompozitlerin Tanımı ve Kısa Tarihi 4
1.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları 5
1.1.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları 6
1.2. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri 6
1.2.1. Matris Malzemeleri 7
1.2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler 7
1.2.1.1.1.Termosetler 8
1.2.1.1.2.Termoplastikler 8
1.2.1.1.3.Polietilen 8
1.2.1.1.4.Polipropilen 9
1.2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler 9
1.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler 10
1.2.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları 11
1.2.2.1.Cam Elyaflar 12

1.2.2.2.Bor Elyaflar 12
1.2.2.3.Karbon Elyaflar 13
1.2.2.4.Aramid Elyaflar 14
1.3. Termoplastik Kompozitler 14
1.3.1. Termoplastik Kompozitlerin Kullanım Alanları 15
1.3.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları 17
1.4. Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler 17
1.4.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları 18
1.4.2. Şekillendirme Yöntemleri 19
1.4.2.1 Isı ile Şekillendirme(Thermoforming) 20
1.4.2.2 Kompresyon kalıplama(Compression Molding) 21
1.4.2.3. Enjeksiyon Kalıplama (Injection Molding) 21
1.4.2.4. Pultrüzyon (Pultrusion) 22
1.4.2.5. Rulo Şekillendirme (Roll Forming) 23
1.4.2.6 Filament Sarma (Filament Winding) 24
1.5. Literatür Araştırılması 25

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Materyal 30
2.1.1. GF 30
2.1.2. PP 30
2.1.3. GFRPP 32
2.2. Yöntem 33
2.2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması 35
2.2.1.1. Plaka Üretim Süreci 36
2.2.1.2. Test Numune Üretim Süreci 37
2.2.1.2.1. 3 Nokta Eğilme Test Numune Üretim Süreci 38
2.3. Deneysel Çalışmalar 39
2.3.1. Eğilme Deneyleri 39
2.3.2. DSC Testi 41
2.3.3. Basınç Etkisinin İncelenmesi 42
2.3.4. Basınç Uygulama Süresinin Etkisinin İncelenmesi 43

3. BÖLÜM
BULGULAR

3.1. Giriş **44**
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri **44**
3.3. DSC Testleri **49**
3.3.1. Kristalizasyon Değerlendirmesi **55**
3.4. Eğilme testleri **56**

4. BÖLÜM
TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma **64**
4.2. Sonuç ve Öneriler **65**
KAYNAKÇA **66**
ÖZGEÇMİŞ **75**

KISALTMALAR

˚C	: Derece Santigrad
A	: Kesit alanı (mm^2)
ASTM D638	: Plastiklerin Çekme Özellikleri için Standart Test Yöntemi
ASTM D790	: Plastiklerin Eğme Özellikleri için Standart Test Yöntemi
E	: Elastiklik Modülü
F	: Kuvvet (N)
g	: Gram
G	: Kayma Modülü
GF	: Cam elyaf
GFRPP	: Cam elyaf takviyeli polipropilen
H	: Numune kalınlığı
kN	: Kilonewton
L	: Numune uzunluğu
m²	: Metrekare
m3	: Metreküp
MPa	: Megapascal
N	: Newton
PP	: Polipropilen
ε	: Kopma uzaması (%)
ρ	: Yoğunluk (g/cm3)
σ	: Gerilme (MPa)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Konfigürasyon Tablosu.....37
Tablo 3.1. Teorik-Deneysel Entalpi oranları.....55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kompozit malzeme içeriği 7
Şekil 1.2. Takviye elemanın yapısına göre metal matrisli kompozitler 10
Şekil 1.3. Bor elyaf üretim metodu 13
Şekil 2.1. Çalışmamızda kullanılan GFRPP hammaddesi 33
Şekil 2.2. Levhaların üretiminde kullanılan sıcaklığı ayarlanabilir hidrolik pres cihazı 34
Şekil 2.3. Levhaların üretiminde kullanılan kademeli kalıp teknik resmi 35
Şekil 2.4. Hidrolik pres manometre değerleri 36
Şekil 2.5. Konsolidasyon eğrisi 36
Şekil 2.6. Cam elyaf takviyeli propilen ham maddesi 37
Şekil 2.7. Plakaları testere yardımı ile kesilme işlemi 38
Şekil 2.8. Üç nokta eğilme deney numunelerinin 0^o doğrultulu lamina düzeni 39
Şekil 2.9. Üç Nokta Eğilme Deney Düzeneği 40

Şekil 3.1. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 10 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri 45
Şekil 3.2. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 20 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri 46
Şekil 3.3. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 30 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri 47
Şekil 3.4. DSC entalpi ölçüm örneği 50
Şekil 3.5. 10, 20 ve 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin DSC test sonuçları 51
Şekil 3.6. 10, 20 ve 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin DSC test sonuçları 53
Şekil 3.7. 10 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları 57
Şekil 3.8. 20 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları 59
Şekil 3.9. 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları 61

Şekil 3.10. Farklı üretim parametrelerine ait termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları 62

GİRİŞ

Günümüzde sanayi alanında kullanılan malzemelerin çeşitliliği, performans ve dayanıklılık gereksinimlerinin artmasıyla birlikte sürekli olarak gelişmektedir. Özellikle kompozit malzemeler, üstün mekanik özellikleri ve hafiflikleri sayesinde birçok sektörde tercih edilmektedir. Bu bağlamda, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFPP) kompozitleri, otomotiv, beyaz eşya, inşaat ve havacılık gibi farklı alanlarda önemli bir yer edinmiştir. GFPP, cam elyafın polipropilen matrisine entegrasyonu ile üretilen bir kompozit malzeme olup, yüksek darbe dayanıklılığı, ısıya dayanıklılığı ve düşük ağırlığı ile dikkat çekmektedir.

Son yıllarda, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere olan ilgi, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde artmıştır. Termoplastik malzemelerin hafifliği, tekrar kullanılabilirliği, üstün balistik performansı, patlamaya karşı dayanıklılığı ve kolay şekil alma kabiliyeti gibi avantajları ile pek çok alanda kullanımı artmaktadır. Malzeme bilimindeki gelişmelerden en fazla etkilenen alanlardan birisi havacılık sektörüdür. Bu malzemelerin hafif yapısı, yakıt verimliliğini artırması ve emisyonları azaltması amacıyla tasarlanan modern araçlarda ve uçaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe artan yakıt maliyetlerinin yanı sıra işletme ve bakım maliyetleri ile çevresel düzenlemeler, daha fazla hafif malzemelerin kullanımına olan ihtiyacı artırmaktadır. Özellikle havacılık sektörü, yakıt tasarrufu ve taşıma kapasitesinin artırılması gibi önemli hedeflerle cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere yönelmiştir. Uçak yapımında kullanılan bu malzemeler, hem dayanıklılık hem de hafiflik açısından önemli avantajlar sunmakta, böylece havacılık endüstrisinde devrim niteliğinde yenilikler sağlamaktadır.

Günümüzde kompozitlerden planörlerin, motorlu planörlerin, ultra hafif kategorideki uçakların ve İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) yük taşıyıcı yapıları üretilmektedir. Ayrıca kompozit malzemeler, dikey ve yatay dengeleyiciler, kanat ve kaplaması, gövdeler kanatları, rotorları ve diğer parçalar gibi yolcu uçaklarının çeşitli parçalarının üretiminde

tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler, motor kanatları, kuyruk pervaneleri ve fanlar gibi uçaklardaki güç ünitelerinin yapımında kullanılmaktadır.

Termoplastik kompozitler, geri dönüşüm potansiyeli ve üretim maliyetleri açısından da dikkate değerdir. Cam elyaf takviyeli polipropilen (GFRPP), yüksek dayanıklılık, tekrar kalıplanabilme ve geri dönüştürülebilme gibi birçok avantaja sahip bir malzemedir. GFPP, düşük sıcaklıklarda işlem görmesi ve kolay şekillendirilmesi sayesinde ekonomik üretim olanakları sunmaktadır. Ayrıca, cam elyaf takviyeli kompozitlerin geri dönüşüm olanakları, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir avantajdır. Bu kompozit malzemelerin, üretim sonrası geri dönüştürülmesi, atık miktarını azaltmakta ve çevreye olan etkilerini minimize etmektedir.

Cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, uygulama alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Düşük hızlı darbe dayanımı, yüksek çekme ve eğilme dayanımı gibi özellikleri, bu malzemelerin çeşitli uygulamalardaki performansını artırmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe, çarpışma güvenliğini artırmak ve ağırlığı azaltmak amacıyla bu malzemeler tercih edilmektedir. Aynı zamanda, havacılık endüstrisinde, uçak gövdesi ve kanat yapımında kullanılan GFPP, mühendislik açısından önemli bir yenilik sunarak, hem aerodinamik özellikleri hem de yapısal dayanıklılığı artırmaktadır.

Cam elyaf takviyeli polipropilen (GFPP), son yıllarda otomotiv, beyaz eşya ve inşaat sektörleri gibi birçok alanda önemli bir yere sahip olan bir kompozit malzeme türüdür. Kompozit malzemeler, çeşitli matris ve takviye malzemelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip yapılar olarak tanımlanabilir. GFPP, cam elyaf takviyesi sayesinde yüksek darbe dayanıklılığı, hafiflik ve mukavemet gibi önemli avantajlar sunar.

Son 15-20 yılda, termoplastik esaslı kompozitlerin gelişimi, özellikle darbe dayanımı yüksek plastiklerin kullanımıyla birlikte hız kazanmıştır. Bu gelişim, otomotiv endüstrisinde ağırlık azaltma ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Cam elyaf, bu bağlamda, polipropilen matrisinin mekanik özelliklerini artırarak, kompozit malzemelerin performansını üst düzeye çıkarır. Araştırmalar, cam elyaf takviyeli kompozitlerin, metal parçalarla karşılaştırıldığında daha düşük üretim maliyetleri ve daha yüksek çevresel avantajlar sunduğunu göstermektedir.

GFPP'nin mekanik özellikleri, düşük hızlı darbe davranışları üzerinde yapılan çalışmalarla daha da netleşmektedir. Düşük hızlı darbe testleri, bu kompozit malzemelerin dayanıklılığı ve yapısal bütünlüğü açısından önemli veriler sunar. Ayrıca, cam elyafın farklı plastik matrislerle birleşimi, çeşitli malzeme kombinasyonlarının performansını olumlu yönde etkileyerek, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini artırmaktadır.

GFPP'nin mekanik özelliklerinin araştırılması hem mevcut uygulamalar hem de gelecekteki potansiyel kullanımları açısından kritik bir öneme sahiptir. Sürdürülebilirlik perspektifinden de ele alındığında, geri dönüşüm potansiyeli ile GFPP, modern malzeme biliminin önemli bir parçası olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, birçok endüstrideki gelişmelerin temel taşlarını oluşturmaktadır. Bu malzemelerin, hafiflik, dayanıklılık, geri dönüşüm potansiyeli ve ekonomik avantajları, sanayiye olan katkılarını artırmakta ve gelecekte daha fazla kullanım alanı bulmalarını sağlamaktadır. GFPP'nin otomotiv ve havacılık sektörlerinde artan kullanımı, bu malzemenin potansiyelinin sadece başlangıcını temsil etmektedir. Araştırmalar, cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin yanı sıra sürdürülebilirlik ve performans açısından daha fazla geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, cam elyaf takviyeli kompozitlerin geleceği, yenilikçi uygulamalarla daha da şekillenecektir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemeler

Her malzemenin diğerlerinden daha iyi olan bir özelliği vardır. Örneğin, metaller daha dayanıklı malzemeler olarak bilinirken, polimerlerin daha sünek özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Temel olarak kompozit malzeme, daha iyi özelliklere sahip istenen bir maddeyi oluşturmak için iki veya daha fazla malzemenin bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir [1]. Kompozit malzemeler anizotropik ve homojen olmayan malzemelerdir.

Kompozit malzemeler havacılık, uzay, otomotiv, inşaat ve gemi sanayinde yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanımları artmaktadır [2]. Kompozitler, malzeme sistemlerinin ve mekanik özellikleri geliştirilmesi gibi özellikleri ile çevresel risklerin azaltılması, sürdürülebilir enerji yaklaşımları gibi alanları da kapsayan geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır.

1.1.1. Kompozitlerin Tanımı ve Kısa Tarihi

Kompozit malzemeler, vazgeçilmez nitelikleri nedeniyle ilk uygarlıklardan modern zamanlara kadar insanlık tarihi boyunca çok önemli bir rol oynamıştır. Bu malzemeler, daha fazla mukavemet, korozyon direnci, tasarım esnekliği, dayanıklılık ve gelişmiş mukavemet-ağırlık oranları gibi üstün özellikler elde etmek için farklı maddelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. En önemli avantajlarından biri, belirli uygulamalar için özellikleri uyarlama yeteneğidir. Kompozitlerin çok yönlülüğü tıp, inşaat, otomotiv, havacılık, petrol ve gaz ve ev ürünleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmalarına yol açmıştır. Özellikle, kompozit malzemelerdeki gelişmeler roket gibi uygulamalar için çok önemli olmuştur. Kompozitleri ve gelişimlerini anlamak araştırmacılar için hayati

önem taşımaktadır [3]. Kompozit malzemeler genel olarak, bileşenlerini oluşturan malzemelerden daha üstün karakteristik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanan yapılardır. Ancak, bazı özel durumlarda, kompoziti oluşturan malzemelerden daha zayıf özelliklere sahip yapılar da ortaya çıkabilmektedir.

1.1.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, günümüzde uygulama alanlarına ve ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere uygun şekilde üretilebilmektedir. Farklı fiber ve matris kombinasyonları kullanılarak istenen özellikler malzemeye kazandırılabilir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin kullanım alanları her geçen gün daha da genişlemektedir. Takviye elyafının türü, matris malzemesinin bileşimi, kullanılan üretim süreci, elyafların oryantasyonu ve spesifik son kullanım uygulaması yer alır. Bu sınıflandırma değişkenleri, mühendislere özel ihtiyaçları için en uygun malzeme ve üretim tekniklerini belirlemek ve seçmek için çok yönlü bir yapı sunmaktadır [4].

Kompozit malzemelerin avantajları,

- Yüksek mukavemet,
- Aşınma direnci,
- Isı Dayanımı,
- Akustik izolasyon,
- Yorulma ömrü,
- Estetik görünüm,
- Kırılma tokluğu,
- Titreşim sönümlendirme,
- Kimyasal etkilere karşı dayanım sayılabilir.

Her malzemede olduğu gibi, kompozit malzemelerin de avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan biri, matris malzemesinin kullanıldığı ortamda zarar görebilme olasılığıdır. Kullanım ortamının matrise çözücü etkisi olması, ortamın sıcaklık ve nem koşulları gibi faktörler, matris malzemesini olumsuz etkileyebilecek

başlıca nedenler arasında yer alır. Bu durum, kompozit malzemelerin dezavantajları arasında değerlendirilmektedir.

- Ham maddenin pahalı olması,
- Üretimin ve işlenmesinin güç olması,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmaması,
- Tamir edilmelerinin yeni problemler yaratabilmesi,
- Malzemenin kalitesinin üretim yönteminin kalitesine bağlı olması sayılabilir [5].

1.1.3. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

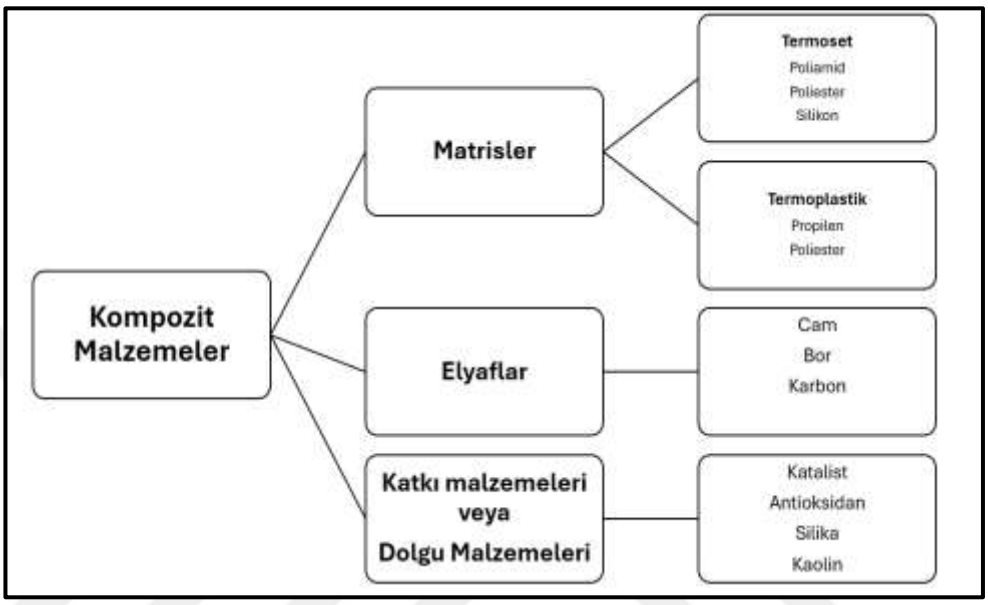
Cam, karbon ve aramid elyaflı fiber takviyeli plastik kompozitler, hibrit kompozitler – Fiber Metal Laminatlar ve metal ve seramik matrisli bileşimler uçak yapılarında yaygın olarak kullanılanlardır [6]. Uçak yapılarında, bu malzemeler sadece mekanik açıdan değil, aynı zamanda yüksek hızlı hareketle belirlenen termal açıdan ve balistik açıdan da fayda sağlamaktadır.

İlk uçaklarda mukavemet/ağırlık oranının malzeme seçiminde en önemli olduğu için kompozit malzemeler kullanılmıştır [7]. Polimer matrisli kompozitler yüksek performanslı askeri uçaklarda yaygın olarak kullanılmasına ve modern ticari uçaklarda bazı uygulamalar için belirtilmesine rağmen, alüminyum alaşımlar ticari uçakların ve askeri kargo ve taşımacılığın gövde, kanat ve destekleyici yapısı için tercih edilmektedir. F–14, F–15, F-16, F/A–18, AV–8B, Eurofighter (EFA), Advanced Jet Fighter (AJF), Joint Strike Fighter (JSF–F35), F–117 Black Hawk, Beech Aircraft Starhip, Pasific Theater B29, APACHE, B–2 Bomber, kompozit malzeme içeren uçaklardan bazılarıdır [8].

1.2. Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri

Kompozit malzeme, genellikle farklı özelliklere sahip en az iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle hazırlanmaktadır [9]. Kompozit malzemeler, mükemmel mekanik ve termal özellikleri ve yapışma özelliklerinden (antikorozif kaplama) dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Kompozit malzemeler, matrise gömülü takviyeler yani dolgu maddeleri olarak da adlandırılmaktadır. Bir kompozit malzeme temel olarak üç fazdan oluşur [11].

- Sürekli faz olarak da adlandırılan matris fazı,
- Matris malzemesiyle çevrili dolgu/takviye fazı,
- Matris ve dolgu/takviye fazından farklı yapı ve özelliklere sahip arayüz fazı.



Şekil 1.1. Kompozit malzeme içeriği

1.2.1. Matris Malzemeleri

Matris, yükün kohezyonunu ve yönelimini sağlamaktadır. Matris termoplastik, termoset ve/veya elastomer tipinde olabilir. Matris seçimi, kompozit malzemenin amaçlandığı kullanıma bağlıdır. Matrisin rolü, takviye elyafları birbirine bağlamak, kısıtlamaları dağıtmak, yapının kimyasal direncini sağlamak ve nihai ürüne istenen şekli vermektir. Bu şekilde elde edilen malzemeler çok heterojen ve genellikle anizotropik yapıdadır. Matrisin ve yükün doğası, yükün şekli ve oranı, arayüzün kalitesi ve kullanılan üretim süreci, kompozit malzemenin özelliklerini etkileyebilecek parametrelerdir. Matris ve takviye metalik, seramik veya plastik olabilir, bu da çok sayıda kombinasyon oluşumunu sağlamaktadır [12].

1.2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer kompozitler, geleneksel malzemelere kıyasla birçok avantaj sağlayan yapı malzemeleridir [13]. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin deniz sistemlerinde

uygulanması, gemi bileşenleri, açık deniz petrol ve gaz kompozitleri, deniz yenilenebilir enerjisi ve su altı onarımı gibi çeşitli çelik bileşenlerinin değiştirilmesiyle sağlanan potansiyel faydaları ile çalışmalarda tercih edilmektedir [14].

1.2.1.1.1.Termosetler

Termoset malzemeler ve bunların kompozitleri uzun bir yaşam döngüsü ile karakterize edilir ve ana uygulamaları uçaklarda, rüzgar türbinlerinde ve yalıtım malzemesi olarak inşaatlarda kullanılır. Bu malzemelerin kullanım ömürlerinin sonunda geri kazanılması ve değerlendirilmesinin, çöp sahalarına atılmasının önlenmesinin önemi göz önüne alındığında, geri dönüşümlerine olan ilgi sürekli artmaktadır. Termoset malzemelerin ve kompozitlerinin başarılı bir şekilde geri kazanılması ve değerlendirilmesi için üç boyutlu yapılarının bozunması ve mono-oligomerlerin dolgu maddelerinin geri kazanılması gerekmektedir [15]. Küçük monomer moleküllerinin, kimyasal reaksiyonlar sonucunda uzun ve aralarında güçlü bağlar bulunan polimer moleküllerine dönüşmesiyle oluşurlar. Bu tür reaksiyonların gerçekleşebilmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı (katalizör) eklenmesi, bazen de enerji uygulanması gerekmektedir. Sıvı haldeki reçine, önce jelleşir ve ardından tamamen sertleşir. Kullanım açısından öneme sahip olan termosetler; fenolikler, amino reçineler, polyester ve epoksiler örnek olarak verilir [16].

1.2.1.1.2.Termoplastikler

Yüksek sıcaklık termoplastikleri içeren malzeme kompozisyonları matris reçinesi olarak, yüksek sıcaklık ve kimyasal kararlılığın genellikle özel sürtünme ve aşınma özellikleriyle birleştirilmesinin gerekli olduğu havacılık endüstrisi, açık deniz teknolojisi ve kimya mühendisliği gibi uygulamalarda tercih edilmektedir [17].

Poliolefinler, çok çeşitli özelliklere sahip olmaları, makul derecede düşük maliyetli olmaları, geri dönüştürülebilir olmaları, kolay işlenebilirlikleri ve çok sayıda uygulama olasılığı nedeniyle büyük başarılara imza atan önemli bir polimer [18]. Poliolefinler arasında polietilen (PE) ve polipropilen (PP) en çok üretilen ve tüketilenlerdir.

1.2.1.1.3.Polietilen

Polietilen, günümüzde etilen gazından üretilen en yüksek hacimli küresel plastiktir [19]. Polietilen (PE), herhangi bir polimerin en basit temel yapısına (CH_2 ünitelerinin tekrarı)

sahip olmasına rağmen, en büyük tonajlı plastik malzemedir [20]. Farklı üretim süreçlerinden, değişen katalizör ve ko-monomer tiplerinden yararlanılarak, geniş bir yelpazede etilen homopolimerleri ve kopolimerleri üretilebilmektedir [21]. Polietilen, dünyada en çok üretilen termoplastiktir ve günümüzde emtia termoplastiklerinin küresel pazar payının üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır. Polietilen, kimyasal olarak inert olması, kolay işlenebilirlik, sürtünme, sıfıra yakın nem emilimi, tokluk ve elektriksel özellikler gibi pek çok avantajı bulunmaktadır [22]. Polietilen elastiktir, kimyasal olarak kararlıdır ve biyolojik olarak parçalanmaz [23].

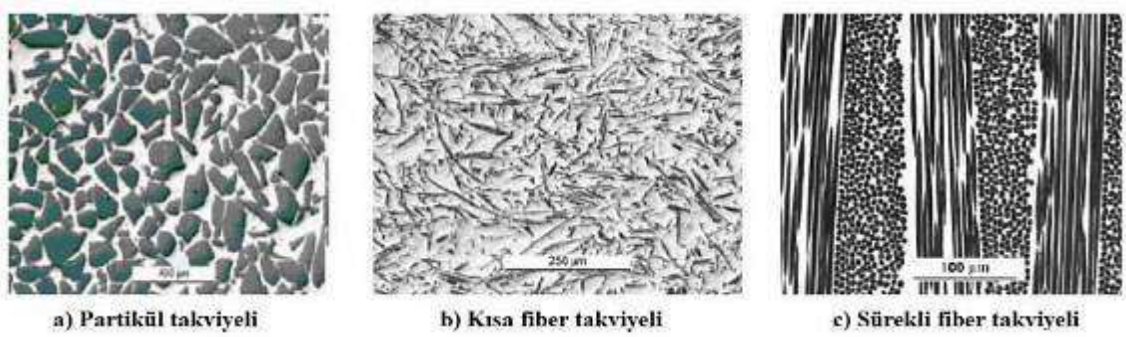
1.2.1.1.4.Polipropilen

Son yıllarda polipropilen, olağanüstü özellikleri, maliyet etkinliği ve işleme kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan termoplastik polimerlerden biri olmuştur [24]. Yıllar içinde polipropilenin geliştirilmesi ve kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olması çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [25]. PP, yarı şeffaf beyaz katı bir malzemedir. Soğuk organik çözücülerde çözünmez, sıcak çözücülerde yumuşar. Birçok kez bükülse bile sertliğini korur. Antioksidan eklenmediğinde, ısı ve ışığın etkisiyle bozulur. Yapısının çok düzenli olması nedeniyle kolay renklendirilemez. İyi bir elektriksel dirence sahiptir, düşük su absorbsiyonu ve geçirgenliği vardır. -9,4 °C'nin altında kırılgandır. Mantar ve bakterilere karşı dayanıklıdır. 60 °C'ye kadar kuvvetli asit ve bazlara dayanıklıdır ancak klor, nitrik asit ve diğer güçlü oksitleyicilerden etkilenir. Yakılabilir ama yavaş yanar. Zehirsizdir ve gıda tüzüğüne uygundur. Düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı, kimyasallara karşı yüksek mukavemet, iyi elektriksel yalıtım, yüksek mekanik mukavemet, düşük nem alma, makul fiyat ve işlem kolaylığı temel özelliklerindendir [26]. Polipropilen, ev eşyaları, mutfak aletleri, paketleme malzemeleri ve laboratuvar eşyalarında yaygın olarak kullanılır. Otomotiv sektöründe akü kapları, tamponlar ve çamurluk eteklerinde, dolgulu türleri ise araç içi ısıtma kanallarında ısı dayanıklılığı nedeniyle tercih edilir. Ayrıca torba üretiminde ve ince film halinde sarma ile paketleme amaçlı kullanımı da yaygındır [27].

1.2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler

Metal-matris kompozitler (MMK'ler), çok çeşitli yapısal ve termal yönetim uygulamaları için potansiyele sahip bir malzeme sınıfıdır [28]. 1960'lı yılların başında, mevcut malzemelerin kullanım sıcaklıklarının üzerinde sıcaklıklarda çalışabilecek ve daha

yüksek spesifik mukavemet özelliklerine sahip malzemelere duyulan ihtiyaç nedeniyle metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler geliştirilmiştir. MMK'lar, sermetler, metalik köpükler, partikül veya fiber takviyeli metaller gibi geniş bir malzeme grubunu içermektedir ve kullanıldıkları metal ve diğer yekpare malzemelere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır [29]. MMK diğer malzemelere ve metallerle karşılaştırıldığında daha düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve esneklik, yüksek tokluk ve darbe dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca elektrik ve ısı iletkenlikleri de oldukça iyidir. Bu kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle Alüminyum, Titanyum, Magnezyum, Bakır, Nikel ve nikel veya demir esaslı süper alaşımlar kullanılır [30]. Metal matrisli kompozitler, yüksek sertlik, kırılma tokluğu, yüksek mukavemet / ağırlık oranı gibi (benzersiz) özellikleri nedeniyle geniş endüstriyel uygulamalara sahiptir. MMK'ların önemli kullanım yerleri; havacılık, otomobil ve denizcilik endüstrisidir [31].



*Şekil 1.2.*Takviye elemanın yapısına göre metal matrisli kompozitler **[32].**

Alüminyum, doğada bol miktarda bulunması, hafifliği ve işlenmesinin kolay olması nedeniyle metal matrisli kompozitlerin üretiminde sıklıkla tercih edilen bir metaldir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, yüksek dayanıklılık ve korozyon direnci gibi avantajlarının yanı sıra düşük maliyetleriyle de öne çıkarak kompozit üretiminde öncelikli bir seçenek haline gelmiştir [33].

1.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matris kompozitler, hem kullanılan fiberlerin hem de matris malzemesinin arzu edilen özelliklerini bir arada barındırmaları sayesinde mühendislik açısından son derece önemli ve kendilerine has niteliklere sahiptir. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık ve yoğun gerilmelere karşı sergiledikleri üstün termomekanik performansları nedeniyle yapısal uygulamalarda kullanım alanlarını giderek genişletmektedir. Proje kapsamında, çeşitli

seramik matris malzemelerinin, seramik esaslı sürekli fiberlerle belirli bir doğrultuda takviye edilerek yüksek termomekanik özellikler sergileyecek seramik matris kompozit sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu kompozitler, oda sıcaklığında olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda da yüksek kırılma dayanımı ve kırılma tokluğu göstermektedir. Karbon, silikon karbür, titanyumsilikon karbür ve aluminosilikat fiberlerle güçlendirilmiş olan bu malzemeler, bazalt cam-seramiği, alumina, silikon karbür, korderit ve müllit gibi matris malzemeleri ile üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde filament sarma ve elle hazırlama yöntemleri kullanılarak oluşturulan ön şekillendirilmiş malzemeler, basınç uygulanmaksızın yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemiyle nihai hale getirilmiştir [34]. Seramik matrisli malzemeler, yüksek sıcaklık uygulamaları gibi özel gereksinimler için karbon ve cam fiberlerle geliştirilmektedir. Savunma sanayii ve havacılık/uzay sanayii gibi yüksek katma değerli sektörlerde, sandviç yapıya sahip seramik matris kompozitler (SMK) yaygın olarak kullanılmaktadır. Son dönemde yapılan araştırmalara göre, SMK'ların sadece bu ileri teknoloji alanlarında değil, aynı zamanda biyomalzeme olarak insan vücudunda da kullanılmaya başlandığı gözlemlenmektedir [35]. Matris elemanı seramik olan kompozit malzemelerde genellikle Al_2O_3, SiC**,** Si_3N_4 ve B_4C gibi malzemeler kullanılmaktadır. Takviye bileşeni olarak ise yaygın biçimde Al_2O_3 ve SiC seramikleri fiber formuna dönüştürülerek tercih edilmektedir. Sert yapılarıyla dikkat çeken Al_2O_3 ve SiC gibi seramik malzemeler, sanayide aşındırıcı elemanlar olarak da geniş kullanım alanına sahiptir. Bu seramiklerin kullanımıyla üretilen kompozit malzemeler, yaklaşık 1200°C sıcaklığa kadar dayanıklılık gösterebilme özelliğine sahiptir [36].

1.2.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerin üretiminde düşük yoğunlukları, yüksek darbe dayanımları, yüksek aşınma dayanımları, yüksek yorulma dayanımları ve yüksek titreşim sönümleme özellikleri nedeniyle cam, karbon, aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmıştır. Elyaflar genellikle bir kompozitteki elyaf ve matris arasındaki yapışma kalitesini iyileştirmek için kimyasal veya elektrolitik oksidasyon yöntemleriyle yüzey işlemine tabi tutulmaktadır.

1.2.2.1.Cam Elyaflar

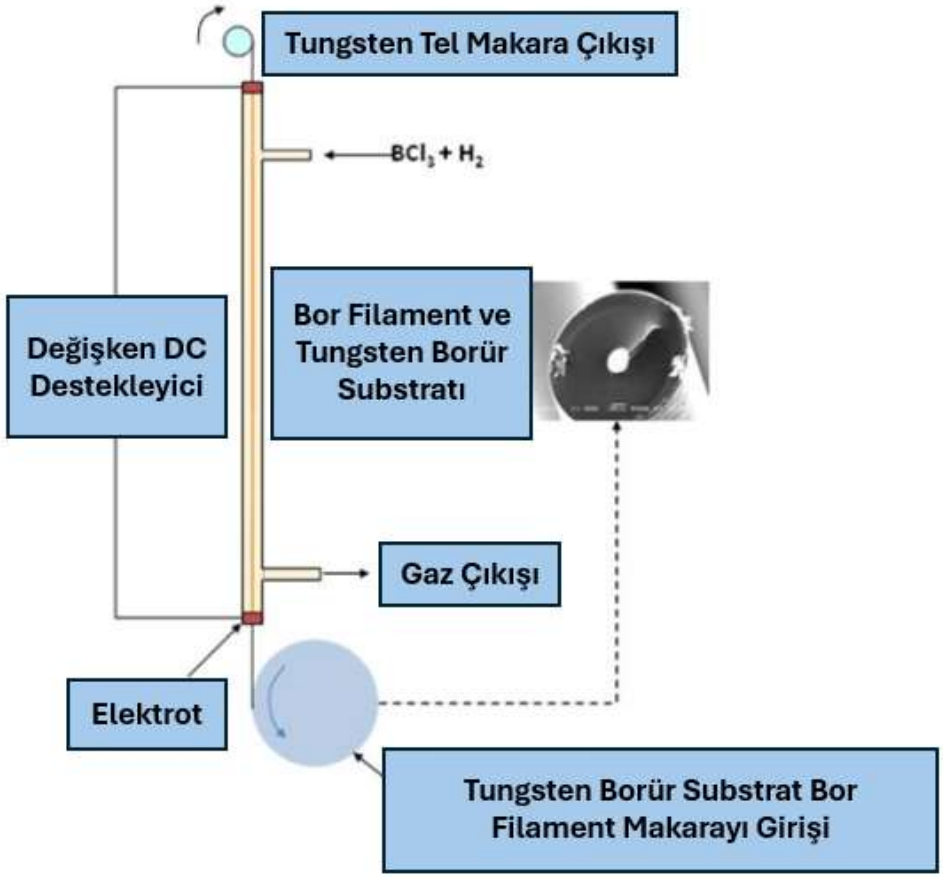
Cam elyafları, erimiş camın çok ince ipliklere çekilmesi ve ardından çekme işlemiyle oluşturulan yapıyı korumak için bunların atmosferle veya sert yüzeylerle temastan hemen korunmasıyla üretilmektedir. Cam elyaflar, inorganik elyaflar kadar güçlüdür ancak moleküler yapıları nedeniyle sert yapıda değildir. Cam elyaflar, düşük yoğunluklu, mükemmel mekanik özelliklere sahip ve oldukça uygun maliyetli olmaları nedeniyle çoğunlukla takviye olarak kullanılmaktadır [37]. Cam elyaflar, lifler dik konumda olduğunda PEI gibi polimerlerin aşınma direncini artırmada potansiyel etki göstermiştir [38].

1.2.2.2.Bor Elyaflar

Bor birçok farklı alanda kullanılmıştır. Bu alanlardan biri de bor elyafıdır. Bor elyaf, şerit formunda bor atomlarından oluşan bir tür metalik elyaftır. Kompozit malzemelerin üretimi, üretim teknolojisi ile geliştirilmiştir. Genellikle bor triklorür gibi bor halojenür bileşiklerinden elde edilen bor atomlarından üretilir. Bor elyaf, yüksek dayanıklılık, yüksek çekme dayanımı, yüksek basınç dayanımı ve yüksek modül gösterir [39].

Bor elyaf (Boron fiber), bor elementinin kullanılmasıyla üretilen, yüksek mukavemet ve rijitlik sunan gelişmiş bir kompozit takviye malzemesidir. Özellikle uzay, havacılık ve savunma sanayilerinde kullanılan bu elyaflar, metalik bor tabakalarının ince bir karbon veya tungsten tel üzerine kaplanmasıyla elde edilir.

Bor lifleri yapısal uygulamalar için ilk kez 1960 yılında incelenmiştir [40]. Bor lifleri inorganik kimyasal liflerdir. Bor lifleri yüksek mukavemete sahip ilk liflerden biridir ve ilk çıkış noktası havacılık endüstrisinde kullanılmıştır [39]. Genellikle bor triklorür gibi bor halojenür bileşiklerinden elde edilen bor atomlarından üretilir [41]. Genellikle bor filamenti olarak bilinen bor elyafı, B5 yan ürününün amorf bir elementidir ve bu da elementsel (serbest) borun önemli bir endüstriyel kullanımını gösterir [42]. Bor lifleri geniş (büyük çaplı) lifler olarak düşünülebilir ve üretim süreçlerinde, elemental bor, 4,0 mil (102 mikron) ve 5,6 mil (142 mikron) çaplar üreten eşit bir tungsten tel alt tabakasına biriktirilir. Tungsten borür alt tabaka üzerinde bor filament üretim örneği Şekil 1'de gösterilmektedir[43].



Şekil 1.3. Bor elyaf üretim metodu [43].

1.2.2.3.Karbon Elyaflar

Karbon takviyeleriyle güçlendirilmiş polimerik kompozitler, gelişmiş bir polimerik kompozit yüksek mukavemet-ağırlık ve sertlik-ağırlık oranları sunduğu için geleneksel metalik malzemelere benzer veya daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir [44]. Hafifliği, yüksek çekme dayanımı ve yüksek korozyon ve yorulma dirençleri nedeniyle, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) uçak, gemi ve otomobil vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmıştır [45]. Son zamanlarda, CFRP yeni yapılarda hızla gelişmektedir, örneğin CFRP köprü yapıları için çelik kablonun yerini almaktadır [46]. CFRP'nin uygulanması ölü yükü önemli ölçüde azaltabilir ve korozyon direncini iyileştirebilir, bu da köprü yapıları için uzun açıklık ve kullanım ömrü sağlamaktadır.

Karbon fiberler, karbon fiber takviyeli kompozitler üretmek için farklı polimerik matrislerle takviye olarak kullanılmıştır. Bir çalışmada, Omrani ve arkadaşları, karbon fiber takviyeli biyo-bazlı epoksi matrisin mekanik özelliklerini incelemişlerdir [47].

Karbon elyafların yapıya dahil edilmesinin kompozitin modülü ve mukavemeti gibi mekanik özelliklerini artırdığını göstermişlerdir.

1.2.2.4.Aramid Elyaflar

Aramid elyaf, olağanüstü mukavemet ve modül sunan öncü sentetik organik elyaf olarak öne çıkmaktadır ve bu da onu gelişmiş kompozitlerde takviye için ideal bir seçim haline getirmektedir [48]. ABD Federal Ticaret Komisyonu'na göre aramid elyaf, oluşturucu maddesi uzun zincirli sentetik poliamid olan ve amid bağlarının (-CO-NH-) %85'inden azının doğrudan iki alifatik gruba bağlı olduğu elyaftır [49]. Aramid elyaflar, cam elyafına kıyasla daha iyi bir mekanik özelliğe sahiptir [50]. Yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe enerjisini emme yetenekleri ve hasar direncine sahip organik liflerdir. Başlıca dezavantajları yüksek maliyet ve yüksek sıcaklıklara ve çevresel korozyona karşı hassasiyettir. Aramid elyaflara olan talep, özellikle endüstriyel, havacılık, askeri ve sivil uygulamalarında artmaktadır [51]. Aramid elyaflar, belirli son kullanımlar için çeşitli sürekli filament iplikler, elyaf, hamur, doğranmış elyaf bileşikleri ve dokunmuş kumaş ürünleri olarak ticari olarak mevcuttur. Aramid lifler, işlenebilirliklerini ve işlevselliklerini artırmak için poliamidin iskeletlerine veya iç yapılarına yeni kimyasal bileşenler ekleyerek daha çevre dostu ve düşük maliyetli sentez yöntemleri tasarlayarak uygulanabilirliği genişletmek için devam eden araştırma çalışmaları devam etmektedir [52].

Aramid liflerinin gelişmiş performansları, kompakt moleküler yapılarına, hidrojen bağlarına, yüksek kristalliliğe ve yüksek yoğunluklarına bağlıdır. Katman katman, kesme kalınlaştırması, iplik çekme ve nanomalzemeler aracılığıyla yüzey fonksiyonelleştirme gibi metodolojiler, epoksi gibi termosetlerle yaygın olarak kullanılan aramid liflerinin modifikasyonu yapılmasının yanı sıra son zamanlarda, araştırmacılar daha yüksek toklukları, kimyasal dirençleri ve termal kararlılıkları nedeniyle aramidlerle termoplastikleri araştırmaktadırlar [53].

1.3. Termoplastik Kompozitler

Elyaf takviyeli polimer kompozitlere olan talebin artmasına paralel olarak, termoset muadillerinin baskın olduğu birçok sektörde termoplastik matrislere olan ilgi yeniden artmaktadır [54]. Termoplastik matrislerinin geri dönüştürülebilirlik, kaynaklanabilirlik

ve termoform edilebilirlik açısından Termoset matrislerinden daha elverişli faydalar sağladığı uzun zamandır biliniyor olsa da yüksek erime viskoziteleri yüksek işleme sıcaklıkları ve basınçları gerektirmesi ve bu nedenle bunları çoğu sektör için maliyet açısından engelleyici ve uygulanamaz hale getirmektedir.

1.3.1. Termoplastik Kompozitlerin Kullanım Alanları

Termoplastik malzemeler, modern sanayinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu yaygınlık, onların çeşitli özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu malzemeler, ısıtıldıklarında yumuşayarak şekil alabilen ve soğuduktan sonra sertleşen özellikleri sayesinde farklı uygulamalar için uygun hale gelmektedir. Özellikle, üretim süreçlerinde sağladıkları esneklik ve hızlı şekil alma yetenekleri, termoplastiklerin tercih edilmesinde önemli bir etken olmaktadır. Elyaf takviyeli polimer kompozitler, mukavemet ve sertlik açısından sahip oldukları avantajlar nedeniyle havacılık, denizcilik, ulaştırma ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde yoğun olarak kullanılmaktadır [55].

Termoplastiklerin en belirgin avantajlarından biri, geri dönüştürülebilir olmalarıdır. Bu özellik, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir fayda sağlamaktadır. Geri dönüşüm süreçleri, atık miktarını azaltmakta ve kaynakların daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, termoplastiklerin çeşitli kimyasal maddelere karşı direnç göstermesi, onları zorlu çevresel koşullara dayanıklı hale getirir. Bu durum, inşaat, otomotiv, havacılık, elektronik ve ambalaj gibi pek çok sektörde, termoplastiklerin kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Örneğin, otomotiv sektöründe hafiflikleri ve dayanıklılıkları sayesinde, yakıt verimliliğini artıran ve araçların performansını yükselten birçok parçanın imalatında termoplastikler tercih edilmektedir. İnşaat sektöründe ise, suya ve neme karşı dayanıklılıkları sayesinde yalıtım malzemeleri olarak kullanımları yaygındır. Ayrıca, beyaz eşya üretiminde, çamaşır makineleri ve buzdolapları gibi cihazların birçok parçasında termoplastiklerin kullanıldığı gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak, termoplastik malzemeler, geniş uygulama alanları ve çevre dostu özellikleri ile modern sanayinin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir. Gelişen teknoloji ile bu malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları daha da genişleyecek, yenilikçi çözümler sunarak sanayinin farklı dallarındaki ihtiyaçları karşılamaya devam edecektir.

Termoplastik matrisli kompozitler yeni nesil plastik malzemeler olup, son on yılda yaygın kullanım alanı bulmuştur. Kullanım alanları enerji, otomotiv ve havacılık uygulamalarıdır.

Otomotiv sektöründe termoplastik matrisli malzemelerin kullanımının yaygınlaşması, uzay ve havacılık sanayisinde de benzer bir artışa yol açmıştır. 2000 yılında Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi, havacılık sektöründe CO2 emisyonlarını azaltmaya yönelik bir karar almış ve bu doğrultuda uçak, helikopter ve uzay araçları için yeni malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu süreçte, geliştirilen malzemelerin üretim yöntemlerinin çevre dostu olması kritik bir öneme sahip olmuştur. Örneğin, 2007 yılında Airbus A350 ve Boeing B787 modellerinin yapısının %50-53'lük bölümü (motor parçaları hariç) kompozit malzemelerden üretilmiştir. Günümüzde bu malzemeler, uçak kapıları, ana kanat yapısı, kanatçıklar, flapler, spoilerlar, slatlar ve uçakların iç aksamlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [56].

Plastik malzemeler, inşaat sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastikler arasında yer alan polistiren, kimyasal maddelere ve suya karşı yüksek direnci sayesinde yalıtım plakalarında, çatı ve duvar kaplamalarında tercih edilmektedir. Polietilen ve polipropilen, nem ve hava sızdırmaz özellikleri ile tesisat borularında kullanılırken, polimetil metakrilat ışık geçirgenliği ile çatı fener plakalarında, karolarda, panolarda ve pencere camlarında yer bulmaktadır. Naylon, yüksek dayanıklılığı ile kapı makaraları ve plangalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, çeşitli termoplastiklerin asfalt üretiminde takviye elemanı olarak kullanıl-ması, asfaltın raf ömrünü artırmakta ve akışkanlık ile süneklik gibi özelliklerini iyileştirmektedir [57].

Termoplastik polimerler, su ve neme karşı yüksek dirençleri ile hava geçirmeme özellikleri sayesinde birçok beyaz eşya parçasında tercih edilmektedir. Örneğin, çamaşır makinelerinde kontrol panelleri, ön kapaklar, deterjan dispenserleri, kazan arkasındaki kayış ve kasnak mekanizmaları, su filtreleme sistemleri ve kazan bileşenleri genellikle polipropilen kompozitlerden üretilmektedir. Bu malzemelerin kullanımı, hem dayanıklılığı artırmakta hem de cihazların performansını iyileştirmektedir [58].

1.3.2. Termoplastik Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Termoplastik matrisli elyaf takviyeli kompozitler, erimiş haldeki yüksek viskoziteleri nedeniyle sınırlı bir yapısal kullanım alanı bulmuş ve bu da takviye malzemesinin yeterince iyi ıslanmasını engelleyerek nihai ürünün mekanik özelliklerinin termosetlerle kıyaslanamayacak düzeyde kalmasına yol açmıştır. Bu durum, otomotiv, havacılık, ulaşım ve inşaat gibi çeşitli sektörlerde termosetlerin hâlâ baskın olmasına neden olmaktadır. Ancak, termoplastik kompozitlerin üretimini içeren yeni uygulamalar hızla artmakta ve bu sorunun çözümüne yönelik yeni yaklaşımlar sunmaktadır [59]. Son 20 yılda termoplastik uygulamaları için birçok yeni teknik önerilmiş, geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir ve son yıllarda, sürekli elyaf takviyeli termoplastik matris kompozitler, mükemmel özellikleri nedeniyle uçak, askeri ve havacılık endüstrilerinde başarıyla kullanılmaktadır [60]. Termoplastik kompozitler, termosetlere kıyasla daha yüksek tokluk, daha hızlı üretim ve her şeyden önce geri dönüştürülebilir yapı gibi bazı avantajlar sunar [61]. Tekrar tekrar ısıtılıp şekillendirilebildikleri için tamamen yeni ve otomatik bir üretime olanak sağlarlar [62]. Diğer malzemelere göre, mükemmel yangın direnci, önemli ölçüde kırılma gerilmesi, daha iyi darbe toleransı, yorulmaya karşı daha yüksek direnç, kısa kalıplama süresi ve daha uzun prepreg raf ömrü gibi çeşitli avantajları vardır [63]. Polimer eritme veya çözücü kullanımı sonucu oluşan sürekli elyaflı termoplastik kompozitlerin emdirilmesinin yüksek maliyeti ve zorlukları, bunların ticari uygulamalarda kullanımını hâlâ sınırlamaktadır. Bu nedenle, maliyet tasarrufu ve mekanik özellikler büyük ölçüde termoplastiğin yüksek viskozitesi nedeniyle elyafların emdirilmesi için daha verimli yöntemler geliştirilmesine ve nihai kompozit parçaların işlenmesine bağlıdır [64]. Esnek prepreg bantlar yapmak için iyi işleme tekniklerinin olmaması nedeniyle kullanımları sınırlı kalmıştır. Bu matrislerin yüksek viskoziteleri ve yüksek işleme sıcaklıkları nedeniyle genel olarak zor işlenebilirliği, sert bant üretimi, çözeltinin buharlaşması sonucu boşlukların oluşması ve bunun sonucunda mekanik özelliklerin kaybolması ve homojen olmayan reçine içerikli prepreg bantlar gibi bir dizi soruna yol açmaktadır [65].

1.4. Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemeler

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik (CFRTP) kompozitler, yüksek performans, kısa işleme döngüsü, stoklama kolaylığı, onarım ve kaynak imkânı gibi avantajları nedeniyle

endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [66]. CFRTP şekillendirme süreci, termoplastik reçinenin erime sıcaklığının üzerinde bir işleme sıcaklığında gerçekleştirilmektedir.

Kompozit malzemelerin tarihinde, termoset ve termoplastik matrisler arasında belirgin farklılıklar ve kullanım zorlukları olmuştur. Termoset malzemelerin geri dönüştürülememesi, uzun çevrim sürelerine ihtiyaç duyması ve üretim sürecinde kimyasal olarak özel tesisler ile depolama alanları gerektirmesi, endüstriyi alternatif çözümler aramaya itmiştir. Termoplastik matrisler ise bu noktada önemli avantajlar sunmaktadır. Genellikle ön şekillendirme süreçlerinden geçirilerek levha formunda ya da prepreg adı verilen önceden reçine emdirilmiş ürünler halinde üretilirler. Termoplastik matrislerin en önemli avantajlarından biri, termosetlerin aksine özel depolama gerektirmemesi ve uzun süre saklanabilir olmasıdır. Ayrıca, bu malzemelerin ısıl işlemlerle kolayca şekillendirilebilmesi, endüstriyel süreçlerde çevrim sürelerini kısaltarak verimliliği artırır. Termoplastik yapıların sunduğu bu esneklik, aynı zamanda üretim maliyetlerini azaltırken geri dönüşüm olanaklarını da genişleterek sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlar.

Birçok akademik çalışmaya konu olan sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler, sahip oldukları yüksek dayanım ve düşük yoğunluk avantajları ile otomotiv endüstrisinde yürütülen metal malzemelere alternatif malzeme olma konusunda ön plana çıkmaktadırlar. Termoplastik kompozit malzemelere uygulanan mekanik etki sırasında gözlemlenen, matris kırılması, matris-elyaf arası bağların kırılması, katmanlar arası kayma eğilimi ve elyaf kırılması adımlarının, metal malzemelere uygulanan mekanik etki sırasında gözlemlenen katlanma ve burulma adımlarına benzer mekanik davranış olması termoplastik SETK malzemelerin metal malzemelere alternatif olabileceğinin en iyi kanıtı olarak gösterilmektedir [67].

1.4.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları

Termoplastik kompozit sektörü, sürekli elyaf takviyeli kompozitler (SETK) üzerinde çalışan araştırmacılar ve bilim kurumları tarafından geliştirilen çeşitli üretim yöntemleri ile hızla gelişmektedir. Bu malzemelerin üretim metotları, farklı uygulama alanları için optimize edilmektedir. SETK levhalarda kullanılan dokuma stilleri, istenilen her şekilde

tasarlanabilirken, bu malzemelerin matrisinin termoplastik olması belirli sınırlılıklar getirmektedir.

Termoplastik matris, dokuma stillerinin belirli özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, matrisin ısıl özellikleri ve akışkanlığı, dokumanın işlenebilirliğini ve son ürünün mekanik özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Bununla birlikte, araştırmalar devam etmekte ve yeni tekniklerin geliştirilmesiyle bu sınırlamaların üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır. Böylece, SETK malzemelerin tasarım ve üretim esnekliği artırılmakta ve farklı endüstriyel uygulamalara daha uygun hale getirilmektedir [68].

Üretim metotları 4 ana başlık altında toplanabilir;

1. Kat matris metodu
2. Film istifleme metodu
3. Toz metodu
4. Birlikte örme metodudur.

1.4.2. Şekillendirme Yöntemleri

Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik (SETK) levhaların şekillendirme yöntemleri, bu malzemelerin hafiflik, yüksek mukavemet ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlarını optimize etmeyi amaçlar. Şekillendirme sırasında kullanılan yöntemler, üretim sürecinin hızını, ürün performansını ve maliyetini doğrudan etkiler. Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik levhaların şekillendirme metotları, üretim süreçlerinde esneklik ve yüksek performans sağlar. Termoplastik matrislerin geri dönüştürülebilir olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından da bu malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. Her yöntem, üretim maliyeti, parça geometrisi ve mekanik gereksinimler gibi faktörlere göre seçilmelidir.

Şekillendirme yöntemleri 6 temel başlık altında incelenmektedir;

1. Isı ile Şekillendirme(Thermoforming)
2. Kompresyon Kalıplama (Compression Molding)

3. Enjeksiyon Kalıplama (Injection Molding)
4. Pultrüzyon (Pultrusion)
5. Rulo Şekillendirme (Roll Forming)
6. Filament Sarma (Filament Winding)

1.4.2.1 Isı ile Şekillendirme(Thermoforming)

Termoform, ekstrüde edilmiş bir plastik levha ile başlayan bir işlemi ifade eden genel bir terimdir. İşlem, plastik levhanın yumuşak veya şekillendirilebilir olduğu bir sıcaklık aralığına kadar ısıtılmasını içerir. Daha sonra levha, soğuk tek taraflı bir kalıba gerilir. Levha, kalıbın şeklini koruduğu noktaya kadar soğuduğunda çıkarılır ve fazla plastik, şekillendirilmiş üründen kesilir. Termoform işlemi, ince ölçülü ve kalın ölçülü pazarlar olarak segmentlere ayrılmıştır. İnce ölçülü "tek kullanımlık ürünler" arasında blister ambalajlar, et tepsileri, içecek bardakları ve sert form-doldur-ve-kapat kapları bulunurken, yapısal özelliklere sahip kalın ölçülü "endüstriyel ürünler" ulaşım, eğlence, elektrik/elektronik, tıbbi ve depolama uygulamalarında kullanılır [69]. Bu işlem, özellikle ince levhaların hızlı bir şekilde istenen forma getirilmesini sağlar ve otomotiv, beyaz eşya gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır.

Avantajları;

- Kısa çevrim süreleri ile büyük hacimli üretimlerde avantaj sağlar.
- Kalıp maliyeti, enjeksiyon kalıplamaya göre daha düşüktür.
- Büyük boyutlu ve karmaşık parçaların üretimine olanak tanır.

Dezavantajları;

- Isıtma ve şekillendirme sırasında bazı bölgelerde malzeme incelmeleri yaşanabilir.
- Enjeksiyon kalıplamaya göre ince detayların işlenmesinde sınırlıdır.
- Cam elyafın kalıp içinde düzgün yayılması her zaman mümkün olmayabilir, bu da mekanik performansı etkileyebilir.

1.4.2.2 Kompresyon kalıplama(Compression Molding)

Kompresyon kalıplama, sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik (SETK) malzemelerin yüksek sıcaklık ve basınç altında şekillendirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu teknik, özellikle kalın, sağlam ve yapısal parçalarda kullanılır ve havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde yaygın olarak tercih edilir. Kompresyon kalıplama, malzemenin homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar ve yüksek mekanik dayanım sunar. Bu yöntemde, takviyeler eritildikten sonra kalıba yerleştirilir ve ardından kalıp kapatılır. Tüm düzenek, 1-2 bar arası basınç uygulayabilen bir prese yerleştirilir. Polimerizasyon işlemi, ortam sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir [70].

Avantajları;

- Kalın ve dayanıklı parçalar üretir, böylece yapısal uygulamalar için idealdir.
- Enjeksiyon kalıplamaya göre daha az kalıp maliyeti gerektirir.
- Birden çok katmanı aynı anda işleyerek zaman tasarrufu sağlar.
- Kalıp içindeki malzemenin iyi yayılması sayesinde minimum atık oluşur.

Dezavantajları;

- Güçlü pres makinelerine ihtiyaç duyulur.
- Çok karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde zorluklar yaşanabilir.
- Sürekli cam elyafın kalıp içinde homojen dağılımını sağlamak zor olabilir.

1.4.2.3. Enjeksiyon Kalıplama (Injection Molding)

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik ve termoset malzemelerin kalıp içine yüksek basınçla enjekte edilerek şekillendirilmesi esasına dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık ve yüksek hassasiyetli parçaların hızlı bir şekilde üretilmesini sağlar. Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin kullanıldığı enjeksiyon kalıplama, yüksek mekanik mukavemet gerektiren parçaların hafif ama dayanıklı hale getirilmesine olanak tanır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin karmaşık şekiller oluşturabilme yeteneği,

tasarım esnekliği, yüksek üretim hızı ve düşük parça maliyeti bu yöntemin tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir [71].

Bu yöntemde, termoplastik prepreg yığını kalıp dışında ısıtılır ve istifin yırtılmaması için uygun deformasyon sıcaklığına ulaştırılır. Ardından, basınç uygulanarak şekillendirme işlemi yapılır ve kalıba yerleştirilir [72].

Avantajları;

- Kısa çevrim süreleri sayesinde büyük hacimli üretime uygundur.
- İnce detaylara sahip parçalar hassas şekilde üretilebilir.
- Her seferinde aynı boyut ve özellikte parçalar elde edilir.
- Parçaların mekanik dayanımı artırılarak hafif ve güçlü ürünler elde edilir.

Dezavantajları;

- Kalıp maliyetleri yüksektir, bu nedenle düşük hacimli üretimlerde tercih edilmez.
- Cam elyaf oranı çok yüksek olduğunda enjeksiyon zorlaşabilir.
- Karmaşık kalıpların tasarımı zaman alır ve maliyetlidir.

1.4.2.4. Pultrüzyon (Pultrusion)

Pultrüzyon, sürekli elyaf takviyeli polimer kompozitlerin, uzun ve sabit kesitli profiller halinde üretilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. İsminden de anlaşılacağı gibi, bu yöntem "pull" (çekmek) ve "extrusion" (ekstrüzyon) kelimelerinden türemiştir. Pultrüzyonda, elyaf takviyesi reçine ile kaplanır ve belirli bir kalıptan çekilerek istenilen profile dönüştürülür. Pultrüzyon, sabit kesitli polimer kompozit yapılar üretmenin en etkili yöntemlerinden biridir. Pultrüzyon profiller köprü inşaatı, ulaşım endüstrisi, enerji sektörü ve inşaat ve mimari mühendisliğinde yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, termoplastik kompozitlerin termoset olanlara göre birçok avantajına rağmen, termoplastik pultrüzyon pazarı termoset olanlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük üretim hacimleri göstermektedir [73]. Bu teknik, özellikle cam elyaf takviyeli termoplastik ve termoset kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Avantajları;

- Sürekli elyaf kullanımı sayesinde mukavemeti yüksektir.
- Özellikle cam elyaf takviyeli termoplastikler, hafif olmasına rağmen dayanıklıdır.
- Sabit kesitli ve uzun profillerde yüksek hassasiyet sağlar.
- Sürekli üretim yöntemi sayesinde yüksek hacimli üretim mümkündür.

Dezavantajları;

- Sadece sabit kesitli, uzun profiller üretilebilir (örneğin boru, çubuk, kiriş).
- Kalıp ve ekipman maliyeti yüksektir, bu yüzden düşük hacimli üretimlerde tercih edilmez.
- Elyafların reçine ile homojen kaplanması zor olabilir, bu da malzeme performansını etkileyebilir.
- Pultrüzyon sonrası kesim ve yüzey işlemleri gerekebilir.

1.4.2.5. Rulo Şekillendirme (Roll Forming)

Rulo şekillendirme, metal veya kompozit levhaların silindirler (rulolar) arasında adım adım bükülerek istenilen kesitte profillere dönüştürüldüğü sürekli bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, özellikle uzun ve sabit kesitli profillerin yüksek hacimli üretiminde tercih edilir. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler de bu yöntemle şekillendirilerek hafif ve dayanıklı parçalar elde edilir. Rulo şekillendirme, sıkıştırma kalıplamadan daha küçük bir şekillendirme enerjisine ihtiyaç duyar çünkü şekillendirme yükünün çoğu sapmalı gerilim olarak çalışır [74].

Avantajları;

- Sürekli bir proses olduğundan, büyük miktarlarda profil üretimi yapılabilir.
- Seri üretim için oldukça ekonomiktir, özellikle metal ve kompozit profillerin üretiminde maliyet avantajı sağlar.

- Üretilen profillerin ölçüleri ve şekilleri her seferinde aynıdır.
- Malzeme israfını en aza indirir ve düşük çapak oluşumu sağlar.
- Rulo şekillendirme ile U, L, T ve C profilleri gibi birçok kesit kolayca üretilebilir.

Dezavantajları;

- Başlangıç maliyeti yüksektir, çünkü her profil için özel rulo setleri gerekebilir.
- Karmaşık üç boyutlu geometrilerin üretimi zordur, sadece sabit kesitli profiller üretilebilir.
- Bazı sert malzemeler, istenilen formlara dönüştürülürken çatlama veya deformasyon gösterebilir.
- Yüksek hızlı üretim için büyük ve pahalı makineler gereklidir.

1.4.2.6 Filament Sarma (Filament Winding)

Filament sarma, sürekli elyafların (cam, karbon veya aramid) reçine ile kaplanarak bir mandrel etrafına sarılmasıyla kompozit malzemelerin üretildiği bir yöntemdir. Bu teknik, özellikle boru, tank, basınçlı kaplar ve roket motoru kılıfları gibi dairesel veya silindirik yapıların üretiminde kullanılır. Termoplastik bant sarma yöntemi, termoset bant sarma yöntemine kıyasla daha az tercih edilmektedir [75]. Sarılan elyaflar, mandrel üzerinde sertleşip katılaştıktan sonra istenen mekanik özelliklere sahip hafif, dayanıklı ve mukavemeti yüksek kompozit parçalar oluşturur. Bu yöntemin uygulama alanları arasında metal iç astarlı yüksek basınçlı tanklar, borular ve direkler bulunmaktadır [76].

Avantajları;

- Elyafların yönlendirilmiş olarak sarılması sayesinde, üretilen parça yüksek mukavemete sahiptir.
- Sarılan malzemenin yoğunluğu düşük olduğu için metal muadillerine göre daha hafiftir.
- Üretim süreci büyük ölçüde otomatikleştirildiğinden insan hatası azalır.

- Elyaf sarma açıları değiştirildiğinde, ürünün mekanik özellikleri kolayca optimize edilebilir.
- Tank ve basınçlı kapların üretiminde üstün performans sunar.

Dezavantajları;

- Yalnızca simetrik, silindirik veya küresel yapılar üretilebilir.
- Özellikle karbon elyaf gibi malzemeler pahalı olabilir.
- Sarma ve sertleşme aşamaları zaman alıcıdır.
- Her farklı ürün için özel bir mandrel tasarlanması gerekebilir.
- Genellikle termoset esaslı reçinelerle kullanılır.

1.5. Literatür Araştırılması

Bu bölümde, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozit malzemelerin üretim parametrelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran literatür çalışmaları incelenmiştir. Özellikle basınç, sıcaklık ve uygulama süresi gibi parametrelerin, kompozitlerin mekanik dayanımı, termal davranışı ve mikroyapısal özelliklerine olan etkilerini ele alan çalışmalar değerlendirilmiştir. Daha önce yapılan bu araştırmalar, mevcut çalışmanın bilimsel temelini oluşturmakta ve literatürdeki bilgi eksikliklerini tespit ederek bu çalışmanın katkısını vurgulamaktadır.

Xian ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada [77], cam elyaf takviyeli polipropilen (GFRPP) çubukların eğme davranışları deneysel ve teorik yöntemlerle incelenmiştir. Eğme testleri, ısınma-ergime ve soğuma-şekillendirme prensibine dayalı olarak tasarlanan özel bir eğme fikstürü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonları ile eğme sırasında çubuklardaki gerilme dağılımı analiz edilmiş ve eğme mukavemetini açıklamaya yönelik bir teorik model geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, eğme fikstürünün eğme sırasında oluşabilecek hasarı önemli ölçüde azaltarak eğme mukavemetinde %43,2'ye kadar iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Eğme bölgesi ile düz bölge arasındaki geçiş alanının, sıkışma ve gerilme nedeniyle kritik bir kırılma noktası olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, eğme yarıçapının

çubuk çapına oranının artmasıyla eğme mukavemetinde yaklaşık %7,9 oranında bir artış gözlemlenmiştir. İç liflerde meydana gelen burulma ve büzülmenin, yerel gerilme yoğunlaşmasına ve buna bağlı olarak reçine matrisinde çatlama ile lif-reçine arayüzünün zayıflamasına yol açtığı ortaya konulmuştur. Bu bulgular, GFRPP çubukların eğme mukavemetini artırmak amacıyla tasarım ve üretim süreçlerinin optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Avci ve çalışma arkadaşları [78],cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla üç nokta eğme testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, lif hacim oranı, polimer matris oranı ve fiber yönelimi gibi parametrelerin eğilme mukavemeti üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, lif içeriğinin artışının eğilme dayanımını iyileştirdiğini ancak aşırı lif içeriğinin malzeme kırılganlığını artırabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, GFRP kompozitlerin termal davranışlarının incelenmesi, polimer ve lif arasındaki bağlanmanın sıcaklık etkisi altındaki değişimlerini anlamak açısından önemli bulunmuştur. Termal analizler, malzemelerin mekanik özelliklerinin sıcaklık koşulları altında değerlendirilmesinde kritik bir araç olarak vurgulanmıştır.

Okereke ve çalışma arkadaşları [79], sürekli elyaf takviyeli cam lifiyle güçlendirilmiş polipropilen matris kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla üç nokta eğme testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, farklı fiber dizilimleri ve katmanlama sıralarına sahip laminatların eğme davranışları incelenmiştir. Testler, laminatların lineer elastikiyet ile plastik deformasyon arasında nasıl bir geçiş yaptığını ve fiber-matris arayüzünde mikro hasar birikiminin etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, fiber yöneliminin eğme mukavemeti üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ve plastik deformasyonun, matristeki viskoelastik özelliklerin belirleyici olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kısa çevrim eğme yüklemelerinde enerji dağılımı ve mekanik sertlikteki azalma gibi olgular gözlemlenmiş ve bu süreçlerin, ilk birkaç yükleme döngüsünde stabilize olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, bu tür kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında daha etkili bir şekilde kullanılmasını destekleyecek önemli deneysel veriler sunmaktadır.

Zhu ve çalışma arkadaşları[80], yüzey modifikasyonu yapılmış cam elyaf ile güçlendirilmiş polipropilen (PP) kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini

değerlendirmek amacıyla bir dizi test gerçekleştirmiştir. Üç nokta eğme testleri, SMGF-PP kompozitlerin bükülme mukavemeti ve modülünün saf PP'ye kıyasla sırasıyla %253 ve %406 oranında arttığını ortaya koymuştur. Bu iyileşmenin, lif-matris arayüzündeki güçlü bağlanmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. DSC testleri, SMGF'nin PP'nin kristalizasyon sıcaklığını artırarak kompozitlerin ısıl özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışma, SMGF'nin PP matrisine eklenmesinin hem mekanik hem de termal performans üzerinde önemli bir etki yarattığını vurgulamaktadır.

Russo ve çalışma arkadaşları[81],polipropilen bazlı cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemek için üç nokta eğme testi ve DSC analizlerini kullanmıştır. Üç nokta eğme testleri, cam elyaf-matris arayüzündeki bağlanma kalitesinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisini ortaya koymuş ve özellikle uyumlulaştırıcı katkıların (compatibilizer) kullanımının eğilme dayanımını %30'dan fazla artırdığını göstermiştir. DSC analizleri ise farklı matris sistemlerinin kristalizasyon davranışlarını incelemiş ve yüksek viskoziteli polipropilenin daha yüksek bir kristalin faz içerdiğini, bunun da mekanik özelliklere pozitif katkı sağladığını ortaya koymuştur. Çalışma, uyumlulaştırıcıların, hem mekanik hem de termal performansı iyileştirerek cam elyaf takviyeli kompozitlerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini artırdığını vurgulamaktadır.

Wang ve çalışma arkadaşları[82], cam elyaf takviyeli polipropilen (GRPP) ve kendinden takviyeli polipropilen (SRPP) kompozitlerin lamine yapılarını incelemek için üç nokta eğme testlerini kullanmıştır. Deneyler, farklı SRPP ve GRPP tabakalarının kalınlık oranlarının (SG oranları) laminatların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Bulgular, SRPP'nin GRPP'ye göre daha yüksek esneklik sağladığını, ancak GRPP'nin daha yüksek eğilme mukavemeti sunduğunu göstermiştir. Ayrıca, GRPP'nin dış tabaka olarak kullanıldığı yapıların (G/S/G), iç tabaka olarak kullanıldığı yapılara (S/G/S) kıyasla %50 daha fazla eğilme mukavemetine sahip olduğu bulunmuştur. SRPP tabakalarının, GRPP'nin sertliğini ve kırılganlığını dengelediği, böylece lamine yapının hem rijitlik hem de tokluk açısından dengeli özellikler sunduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, SRPP ve GRPP tabakalarının mekanik özelliklerini optimize etmek için etkili bir yol sunmaktadır.

Çakır ve Berberoğlu tarafından yapılan çalışmada[83], cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için üç nokta eğme testlerini gerçekleştirmiştir. Vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM) ile üretilen ve hacimce %30, %40, %50 ve %60 oranında cam elyaf içeren kompozitler ASTM standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Test sonuçları, cam elyaf oranının artışıyla birlikte eğilme dayanımında belirgin bir iyileşme sağlandığını göstermiştir. Özellikle %30'dan %60'a kadar artan elyaf oranı, eğilme dayanımını yaklaşık iki kat artırmıştır. Eğilme uzamasında büyük bir değişiklik gözlenmezken, cam elyafların epoksi matris içerisindeki etkisiyle malzemenin mekanik performansında önemli bir artış elde edilmiştir. Bu çalışma, cam elyaf oranının artırılmasının kompozit malzemelerin eğilme dayanımı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Geleneksel termoset polimer matrisli kompozit malzemelerin yerini, son yıllarda termoplastik polimer matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler (TPC) almaya başlamıştır. TPC'ler, termosetlere kıyasla daha fazla avantaj sunar. Birinci olarak, termoplastik matrisli malzemeler geri dönüştürülebilir özelliktedir. Bu özellik, kullanım ömrünü tamamlamış veya hasar görmüş parçaların geri dönüştürülüp yeniden kullanılmasını sağlayarak çevreci ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunar. İkinci olarak, termoplastik matrisli malzemeler, daha yüksek darbe dayanımı ve daha iyi çatlak direnci gibi mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellik, yapıların daha dayanıklı ve güvenli olmasını sağlar. Ayrıca, termoplastik matrisli malzemeler, daha hızlı üretim süreçleri ve daha yüksek üretim hızı ile karakterizedir. Bu da endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve ekonomik bir çözüm sunar. Bu nedenlerle, termoplastik polimer matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelere geçiş, ileri teknoloji sektörlerinde daha çevreci, sürdürülebilir, dayanıklı ve performans açısından üstün ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır

Tez çalışmasında termoplastik kompozit malzemeler ile levha üretilmesi ve levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak polipropilen termoplastik materyali ile takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin tümünde cam elyaf takviyeli polipropilen (CFRP) kompozit kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemenin üretimindeki değişkenlerin kompozit malzeme üzerindeki mekanik davranışı incelenmiştir. Farklı üretim parametreleri ile üretilen kompozit malzelerde kullanılan materyallerin içeriği aynıdır. Elde edilen kompozit plakalar testere yardımı ile kesilerek ASTM standartlarında eğme numuneleri hazırlanmıştır. Malzemelerin testleri MTS Criterion C43.504E model cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok endüstri alanında termoplastik matrisli, cam elyaf takviyeli kompozit yapılara verilen önem artmıştır. Bunun sebebi olarak özgül mukavemetin yüksek oluşu, şekil verilebilirliği ve geri dönüşüm kabiliyeti gösterilmektedir. Cam elyaf ise diğer elyaf çeşitlerine arasında düşük maliyete sahip olması açısından bu çalışmada tercih edilen takviye malzemesidir.

2.1. Materyal

GF, polimerik matris kompozitler için en yaygın kullanılan takviyelerden birisidir. GF'lerin, düşük maliyetleri, elektrik iletkenliği, yüksek çekme mukavemetleri, çeşitli şekillendirilebilme yetenekleri, yüksek kimyasal dirençleri ve yalıtım özellikleri gibi birçok avantajı bulunmaktadır [84]. PP, çeşitli uygulamaları ve özellikleriyle tercih edilen sentetik polimerdir. Polipropilen, mukavemeti, tokluğu ve yüksek erime noktası nedeniyle birçok malzemede kullanılmaktadır[85]. GFRPP, mekanik özelliklerini geliştirmek için polipropileni cam elyaflarla birleştirilmiş bir kompozit malzemedir.

2.1.1. GF

Cam elyaflar (GF), polipropilen (PP) bazlı kompozitlerde en çok kullanılan takviye maddesidir, çünkü özellikleri ve maliyet bakımından iyi bir dengeye sahiptirler. Ancak, nihai özellikleri esas olarak polimer-elyaf ara fazının mukavemeti ve kararlılığı tarafından belirlenmektedir [84]. Elyaflar, yapışma zayıf olduğunda etkili bir takviye malzemesi olarak kullanılamazlar. Ayrıca, fazlar arasındaki yapışma, yüksek sıcaklıklar ve/veya yüksek nem gibi çevre koşullarında ve malzemenin maruz kalabileceği stres alanlarında kolayca bozulabilmektedir.

2.1.2. PP

Polipropilen, 11 Mart 1954'te İtalya'nın Milano kentinde keşfedilmiştir [86]. Polipropilen (PP), sert ve dayanıklı bir plastiktir ve çeşitli molekül ağırlıklarında ve kristalinitelerde üretilmektedir [87]. Polipropilen gibi yarı kristalin polimerler, plastik işleme endüstrisi tarafından çok sayıda ürün için temel malzemeler olarak kullanılır.

Polipropilen, genellikle petrol rafinasyonunun gaz halindeki yan ürünlerinden (gaz yağı, etan ve propan gibi) elde edilen propilenin, katalizörlerin varlığında, kontrollü sıcaklık ve basınç altında polimerize edilmesiyle hazırlanmaktadır [88]. Genel olarak, işleme

adımları eritme, şekillendirme veya kalıplama ve soğutmadır[89]. Soğutma aşaması özellikle ilgi çekicidir çünkü ısı transferi ve kristalleşme birbirine bağlıdır. Katılaşma sırasındaki mekanik gerginlik de kristalleşme üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Katılaşma sırasındaki koşulların sonucu olan kristal yapı, nihai ürünün özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Zincirin her bir diğer karbon atomuna metil (CH_3) grupları bağlı uzun, doğrusal bir karbon atomları polimer zinciri oluşturulmakta ve polipropilenin kristalliği ve moleküler ağırlığı sentez süreci sırasında kontrol edilebilmektedir. Polipropilen, propilen monomerinin titanyum bazlı bir katalizörle polimerleştirilmesiyle üretilmektedir[90]. Polimerizasyon reaksiyonunu başlatmak için bir yardımcı katalizör (trietilalüminyum) eklenir ve polimer molekül ağırlığını kontrol etmek için reaktörde hidrojen kullanılmaktadır. Bu reaksiyon, bulamaç veya gaz fazı tipi bir işlem kullanılarak üretilmektedir.

PP, polietilene benzer özelliklere sahip sert ve katı bir termoplastik polimerdir. Hammadde polimerleri arasında en düşük olan 0,895–0,92 g/cm^3 aralığında bir yoğunluğa ve 130–170°C aralığında bir erime noktasına sahiptir; ticari izotaktik polipropilen 0,900–0,905 g/cm^3 aralığında bir yoğunluğa ve 160–166°C aralığında bir erime noktasına sahiptir [91].

PP, yüksek gaz ve su geçirgenlik direnci, mekanik özellikler, alev direnci, yüksek ısı bozulma sıcaklığı gibi mükemmel özelliklere sahip yaygın bir termoplastik polimerdir [93]. Polipropilen, plastik üretim endüstrisinde çeşitli son ürünler, özellikle plastik ambalajlar üretmek için polimer malzemelerde yaygın olarak kullanılır. PP, düşük maliyetlidir ve polietilenden sonra en yaygın olarak üretilen ikinci emtia plastiğidir [91]. PP'nin düşük maliyeti, işlenebilirliğinin kolaylığı, iyi mekanik özellikleri ve organik çözücülere karşı direnci ile ilgi çekici bir mühendislik malzemesidir [93]. Polipropilenin en büyük dezavantajları, zayıf çizilme direnci ve yapışma eksikliğidir. Polipropilene oksijen, ultraviyole ışık ve termal bozulmadan korumak için stabilizatörler eklenmektedir [94]. Reçine berraklığını, alev geciktiriciliğini veya radyasyon direncini iyileştirmek için de katkı maddeleri eklenmektedir.

PP, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde matris malzemesi için ideal bir seçenektir [95]. Bu materyal, yüksek deformasyon sıcaklığına ve uygun boyut sabitliğine sahiptir. Kullanımlıkemelerin geri dönüştürülebilme yeteneği, tek kullanımlık atıkları ve

dolayısıyla maliyet etkinliğini en aza indirecek bir faydayı sağlamaktadır. Geri kazanılan polipropilen, çekme dayanımı ve mukavemet gibi dikkate değer mekanik özellikler gösteren kompozitler ve doğal polipropilenle karşılaştırıldığında iyi boyut sabitliğine sahip olan daha yüksek bir yoğunluğa ve daha az gözenekliliğe ve su emme özelliğine sahipti.

2.1.3. GFRPP

Cam elyaf takviyeli kompozitler, çeşitli üretim teknolojileri ile hazırlanmakta ve farklı uygulama alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İlk olarak, antik Mısırlılar, ısı ile yumuşatılmış camdan çekilmiş cam liflerini kullanarak kaplar üretmişlerdir. Sürekli cam liflerinin üretimi ise ilk kez 1930'larda yüksek sıcaklıkta elektrik uygulamaları için gerçekleştirilmiştir[96]. Cam elyaf takviyeli polipropilen, otomotiv ve havacılık sektöründe çeşitli parçaları üretmek için yaygın olarak kullanılan termoplastik kompozitlerden biridir. GFRPP, özellikle nemli ortamlarda mukavemet ve dayanıklılığın kritik olduğu endüstrilerde önemlidir [97]. Geliştirilmiş mekanik performans, daha hafif ağırlık, laminat yerleşiminin etkili bir şekilde uyarlanması, diğer yapısal parçalarla entegrasyon kolaylığı, tasarım kolaylığı ve hızlı işlem süresi cam elyaf polipropilenin kullanılmasının başlıca nedenleridir [98]. Çalışmamızda GFRPP termoplastik kompozit malzemenin üretim parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Termoplastik prepregler, oda sıcaklığında uzun süreli raf ömrü sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. İşlem sürelerinin kısa olması, kolayca yeniden şekillendirilebilmeleri ve termoset prepreglere kıyasla daha yüksek bir tamir edilebilirlik kapasitesine sahip olmaları, onları öne çıkaran başlıca özelliklerdir. Bu avantajlar, termoplastik prepreglerin kullanım alanlarını genişleterek endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmesini sağlamaktadır. Termoplastik prepregler, termoset prepreglere benzer şekilde reçine emdirme ve sıcak eriyik kaplama teknikleri kullanılarak üretilmektedir. Ancak, termoplastik malzemelerin yüksek kimyasal direnç göstermesi, reçine emdirme tekniğinin uygulanmasını daha karmaşık hale getirmektedir. Sıcak eriyik kaplama yöntemi ise, ekstrüzyon işlemi ile benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde, lifler ve termoplastik reçineler eş zamanlı olarak işlenerek levha formunda ekstrüde edilmektedir. Termoplastik prepreg üretimi için ayrıca film istifleme ve kuru toz biriktirme gibi yöntemler de kullanılmaktadır. Film istifleme yönteminde, termoplastik reçine filmi,

takviye malzemeleri ile birlikte istiflenir ve elyafların tamamen emprenye edilmesi amacıyla ısı ve basınç altında birleştirilir. Bu yöntemler, termoplastik prepreglerin üretim sürecinde geniş bir esneklik sunmaktadır [99].

2.2. Yöntem

Termoplastikler ve elyaf takviyeli termoplastikler, günümüz endüstrilerinde ve uygulamalarında, bazılarının ıslak ortama yönelik olduğu uygulamalarda büyük önem taşımaktadır[100]. Tez çalışmasında iki farklı kalınlıkta GFRPP kompozit levha tercih edilmiştir. 6 ve 14 katman sayılarına sahip kompozit levhalar kullanılmıştır. Kompozit levhalar sıcak pres yöntemi ile kademeli kalıpta 25x25 cm boyutlarında üretilmiştir. Kompozit üretim yöntemleri malzemelerin kullanım yeri ve özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan malzemeler havacılık, iç mekan tasarımı (koltuk, panel vb.), motor bileşenleri ve zırh sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Havacılık yapılarında kullanılmak üzere cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar sunulmaktadır. Çalışmada, malzeme üretimindeki iki temel parametrenin – üretim sırasında uygulanan basınç ve malzemenin basınç altında kalma süresi – kompozitlerin mekanik davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, 6 katman (2 mm) ve 14 katman (4 mm) kalınlığa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen levhalar, kademeli kalıp kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmamızda kullanılan GFRPP hammaddesi

Üretim sürecinde, pres basıncı 10 bar, 20 bar ve 30 bar seviyelerinde ayarlanmış ve her bir basınç seviyesi için malzemeler sırasıyla 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika süreyle basınç altında tutulmuştur. Bu üretim parametreleri ile 18 farklı konfigürasyona sahip kompozit test plakası hazırlanmıştır. Üretim esnasında kullanılan malzeme içeriği sabit tutulmuş; matris malzemesi olarak polipropilen (PP) ve takviye malzemesi olarak cam elyaf tercih edilmiştir. Elde edilen kompozit plakalar, standartlara uygun test numuneleri üretmek için testere yardımıyla kesilmiş ve ASTM standartlarına göre eğme test numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra, 4mm kalınlığa sahip numuneler eğme testlerine tabi tutulmuş ve üretim parametrelerinin kompozit malzemenin mekanik performansına etkisi detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı üretim parametreleri ile üretilen cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik özelliklerini ortaya koymak ve bu parametrelerin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini sistematik bir şekilde analiz etmektir.



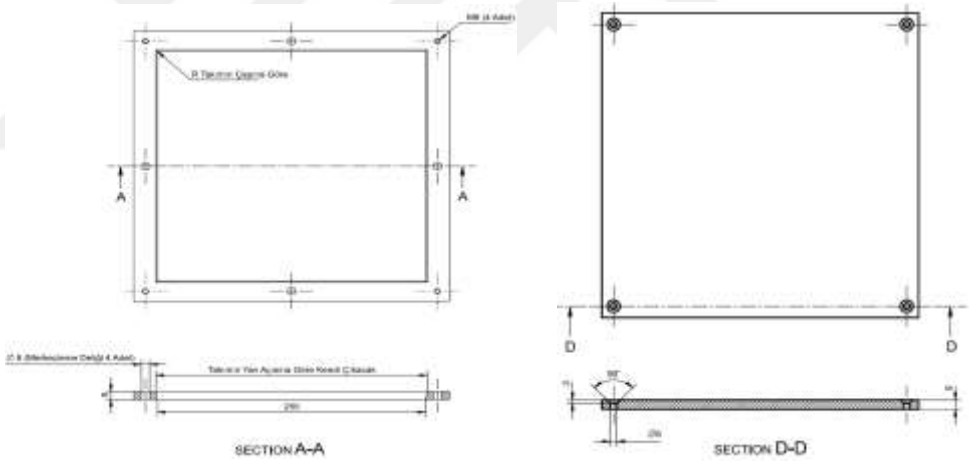
Şekil 2.2. Levhaların üretiminde kullanılan sıcaklığı ayarlanabilir hidrolik pres cihazı

Tez çalışmasında kullanılan kompozit malzememiz Durfom İzolasyon ve Ambalaj San. Tic. A.Ş. şirketi tarafından üretilmiştir. Firmadan temin edilen malzeme üzerinde üretim aşamasında farklı plaka kalınlıklarında uygulanan sürenin ve basıncın etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öncelikle tek yönlü cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzeme ile levha üretimi yapılmıstır. Levha üretiminde, 0º cam elyaf ile üretim gerçekleştirilmiştir. Malzeme üretimi Sekil 2'de resmi görüntelenen hidrolik bir pres ve kalıptan oluşan düzenek hazırlanıp sıcak kalıplama yöntemiyle

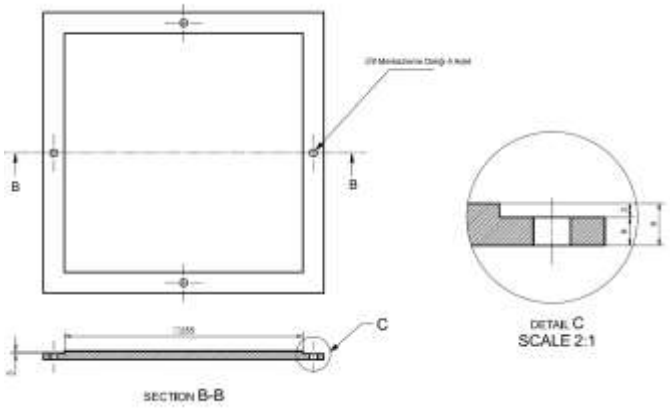
gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, çalışma hem havacılık yapılarında kullanılabilecek hafif, dayanıklı ve üretimi kolay kompozit malzemelerin tasarımına yönelik yeni bilgiler sunmakta hem de bu alandaki mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2.2.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan deney numunelerinin hazırlanmasından önce, kademeli kalıp yardımıyla gerekli plaka üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cam elyaf takviyeli polipropilen (GFRPP) kompozit malzemeler, iki farklı kalınlıkta plaka üretimi için sıcak pres yöntemi ile şekillendirilmiştir. Plaka kalınlıkları 2 mm (6 katman) ve 4 mm (14 katman) olarak belirlenmiştir. Üretim sürecinde kullanılan plakalar 0º olacak şekilde tek yönlü olarak kademeli kalıp içerisine dizilmiş ve plaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, hem mekanik dayanım hem de homojen bir yapı elde edilmiştir.



a. Orta Kalıp b. Alt Tabla



c. Zımba

Şekil 2.3. Levhaların üretiminde kullanılan kademeli kalıp teknik resmi

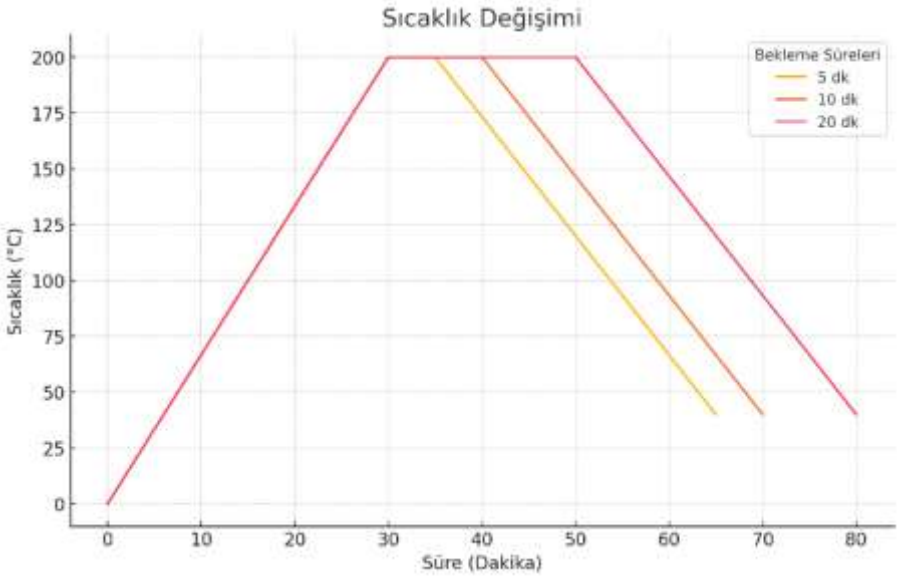
2.2.1.1. Plaka Üretim Süreci

Plakaların üretiminde kademeli kalıp ve hidrolik pres düzenekleri kullanılmıştır. Şekil 2'de bu üretim aşamasında kullanılan hidrolik pres ve Şekil 3'te kalıp düzenekleri gösterilmektedir. Kalıp içerisine yerleştirilen cam elyaf takviyeli polipropilen katmanlar, 10 bar, 20 bar ve 30 bar pres basınç seviyelerinde preslenmiş ve sırasıyla 5, 10 ve 20 dakika süreyle basınç altında tutulmuştur. Bu işlem sonucunda, farklı kalınlık ve basınç seviyelerinde 18 farklı konfigürasyona sahip plaka elde edilmiştir.



a.10 Bar ***b.20 Bar*** ***c.30 Bar***

Şekil 2.4. Hidrolik pres manometre değerleri



Şekil 2.5. Konsolidasyon eğrisi

Tablo 2.1. Konfigürasyon tablosu

Pres Basıncı (Bar)	**Süre (Dakika)**
10	5
	10
	20
20	5
	10
	20
30	5
	10
	20



a. 6 Katmanlı Üretim ***b. 14 Katmanlı Üretim***

Şekil 2.6. Cam elyaf takviyeli propilen ham maddesi

2.2.1.2. Test Numune Üretim Süreci

Üretilen plakalar, ASTM standartlarına uygun olarak test numuneleri oluşturmak için testere yardımıyla kesilmiştir. Kesim işlemi sırasında, plaka üzerinde belirlenen geometriye uygun olarak eğme testleri için numune hazırlıkları yapılmıştır.



Şekil 2.7. Plakaları testere yardımı ile kesilme işlemi

2.2.1.2.1. 3 Nokta Eğilme Test Numune Üretim Süreci

Cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozitlerin üç nokta eğme testi ile mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla test numuneleri hazırlanmıştır. Numune hazırlık sürecinde, öncelikle hazır olarak temin edilen GFR-PP kompozit plakalar, test standartlarına uygun boyutlara getirilmiştir. Bu kapsamda, kompozit plakalar kademeli kalıba yerleştirilebilmesi için 25 x 25 mm boyutlarında hassas bir şekilde kesilmiştir. Test numunelerinin kalınlığının 4 mm olarak belirlenmesi amacıyla, kesilen kompozit plakalar üst üste yerleştirilmiş ve her bir numune için toplamda 14 adet plaka kullanılmıştır. Numune hazırlığında kullanılan kademeli kalıp sistemi, numunelerin homojen bir şekilde konsolide edilmesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Kalıp içindeki numune alanının genişliği 6 mm olup, hedeflenen 4 mm kalınlık, destek sac levhası yerleştirilerek elde edilmiştir. Bu destek sistemi, numunelerin belirlenen kalınlıkta düzgün bir yüzey elde etmesine olanak tanımıştır. Numuneler, sıcak presleme işlemi sırasında 200°C sıcaklık altında, farklı basınç ve süre koşullarına tabi tutulmuştur. Üretim parametreleri olarak 10, 20 ve 30 bar basınç seviyeleri ve 5, 10 ve 20 dakika süreleri uygulanmıştır. Bu farklı parametrelerin etkilerini karşılaştırabilmek amacıyla, her bir üretim koşulundan 3 adet tekrarlı numune hazırlanmış ve toplamda 27 adet test numunesi üretilmiştir. Sıcak presleme süreci, numunelerin lif-matris ara yüzey bağlanmasını optimize etmek ve boşluk (voids) miktarını minimize etmek için dikkatle kontrol edilmiştir. Hazırlanan

numunelerin boyutları ve geometrik özellikleri, üç nokta eğme testleri için kullanılan ASTM D790 standardına uygun olarak düzenlenmiştir. Bu standart, numunelerin mekanik testlerde doğru bir şekilde değerlendirilmesini ve sonuçların karşılaştırılabilir olmasını sağlamıştır. Numunelerin üretim süreci, hem mekanik performansı etkileyen mikroyapısal değişiklikleri hem de malzeme homojenliğini optimize etmek amacıyla titizlikle yürütülmüştür. Böylece, üretim sürecinde yapılan her adımın, test sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği üzerindeki etkisi minimize edilmiştir.

2.3. Deneysel Çalışmalar

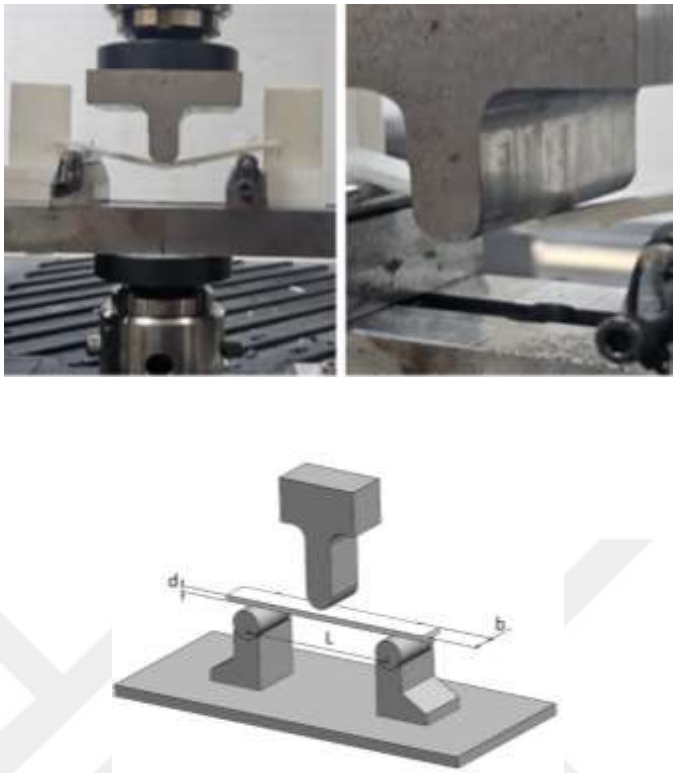
2.3.1. Eğilme Deneyleri

Eğilme deneyi, malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacı ile yapılır. Eğilme deneyi ile malzemenin elastisite modülü, eğilme momenti ve maksimum sehim miktarı tespit edilir. Üç nokta eğilme deneyleri cam elyaf takviyeli polipropilen termoplastik kompozit tabakaların eğilme anında gösterdikleri dayanımı incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Üç nokta eğilme deney numunelerinin 0^o doğrultulu lamina düzeni

Deneylerde farklı matrisli termoplastik kompozit malzemeler için 3'er adet üç nokta eğilme numuneleri test edilmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.9. Üç nokta eğilme deney düzeneği

Cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu test, kompozit malzemelerin gerilme kapasitesi ve deformasyon davranışlarını analiz etmek için kullanılan standart bir yöntemdir. Deneysel ölçümler, MTS Criterion C43.504E model cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve test sürecinde ASTM D790 standardı gerekliliklerine bağlı kalınmıştır.

Test düzeneklerinde, numuneler düz bir hat üzerinde yerleştirilmiş iki destek üzerine konumlandırılmış ve açıklığın ortasına sabit bir gerinim hızıyla yük uygulanmıştır. 1 mm/dk sabit yükleme hızı, testlerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini sağlamak için kullanılmıştır. Numunelerin destek uzunluğu/derinlik oranı 32:1 olarak ayarlanmış olup, bu oran ASTM D790 standardına uygun şekilde belirlenmiştir. Destek açıklığı 96 mm, test edilen kirişin genişliği ise 12,7 mm olarak sabitlenmiştir. Test sırasında numuneler, ya dış yüzeyde kırılma gerçekleşene kadar ya da maksimum %10,0 gerinim seviyesine ulaşana kadar eğilmeye devam etmiştir. Bu parametreler, malzemenin hem elastik hem de plastik deformasyon davranışını analiz etmek için kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada, üretilen GFR-PP levhaların mekanik özelliklerini daha iyi anlamak için farklı

üretim parametreleri uygulanmıştır. Levha üretiminde sıcaklık ve kalınlık sabit tutulmuş, ancak levhaların üretiminde uygulanan basınç (10, 20, 30 bar) ve basınç uygulama süresi (5, 10, 20 dakika) değiştirilerek bu değişkenlerin malzeme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıcak presleme süreci, malzemelerin lif-matris ara yüzey bağlanmasını optimize etmek ve boşluk miktarını minimize etmek amacıyla dikkatle kontrol edilmiştir.

Sonuç olarak, bu deneysel test kurulumu, üretim parametrelerinin GFR-PP kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak ve optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. ASTM D790 standardına uygun olarak yürütülen üç nokta eğme testleri, kompozit malzemelerin elastik ve plastik deformasyon davranışlarını güvenilir bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılmıştır. Tablo-1'de üretilen malzemelerin sistematik sıralamasının ve adlandırılmasının yapıldığı yazmaktadır.

2.3.2. DSC Testi

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), geçiş sıcaklığı ($T°_t$) ve entalpi değişimi (ΔH) gibi malzemelerin termal özelliklerini karakterize etmek için yaygın ve yaygın olarak kullanılan bir termoanalitik tekniktir[101]. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) testi, bir malzemenin faz değişim sıcaklık aralığı, erime/katılaşma ısısı ve sıcaklığa bağlı entalpi gibi termal özelliklerini ölçmek için yaygın bir şekilde kullanılan standart bir yöntemdir. Bu yöntem, numune ile referans arasındaki sıcaklık farkını ölçerek ısıl transfer süreçlerini nicel olarak analiz etmeyi mümkün kılar[102]. Malzemelerin termal özelliklerini incelemek için kullanılan hassas bir analiz yöntemidir. Bu teknik, bir malzemenin ısı akışını sıcaklık veya zaman fonksiyonuna göre ölçerek, faz geçişleri ve termal davranışları hakkında bilgi sağlar. Polimerler, kompozit malzemeler ve diğer termoplastiklerin termal özelliklerini anlamada yaygın olarak kullanılan DSC, malzemelerin cam geçiş sıcaklığı (Tg), erime sıcaklığı (Tm), kristalizasyon sıcaklığı (Tc) ve termal stabilite gibi kritik parametrelerini değerlendirme imkânı sunar. DSC analizi, bir referans malzeme ile test edilen numune arasında oluşan ısı farklarını ölçerek çalışır. Bu ölçüm, malzemenin ısı kapasitesi, entalpi değişimi ve faz geçişi sırasında enerji depolama veya salma kapasitesini belirler. Örneğin, yarı kristalin polimerlerin erime ve kristalleşme davranışları, DSC ile kolayca analiz edilebilir. Bu da malzemenin kristal yapısının derecesi, homojenliği ve termal performansı hakkında bilgi verir. Cam geçiş sıcaklığı (Tg) analizi ise amorf ve yarı kristalin malzemelerin çalışma sıcaklıklarının

belirlenmesine yardımcı olur. DSC, kompozit malzemelerde lif-matris ara yüzeyinin etkileşimini anlamak ve üretim süreçlerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için de kullanılır. Örneğin, bir kompozit malzemenin üretiminde uygulanan sıcaklık ve süre parametrelerinin termal davranışa etkisi DSC ile incelenebilir. Bu, malzemenin mekanik özellikleriyle termal davranışının ilişkilendirilmesine olanak tanır. Ayrıca, DSC analizi, polimer matrislerin termal degradasyon sınırlarını belirlemede ve malzeme dayanıklılığını optimize etmede önemli bir rol oynar.

Isı kompanzasyonu ve güç kompanzasyonu gibi farklı DSC teknikleri vardır. Güç dengelemeli DSC'de, elektrik gücü şeklindeki ısı akışı, cihaz tarafından sırasıyla zamanın (izotermal deneyler) veya sıcaklığın (izotermal olmayan deneyler) bir fonksiyonu olarak ölçülür. Güç dengeleyici DSC'nin altında yatan prensip, numunede meydana gelen endotermik veya ekzotermik kimyasal reaksiyonlar veya fiziksel faz geçişleri sırasında, referansa göre bir numunede dengeleyici bir gücün serbest bırakılması veya emilmesi gerektiğidir. Aslında fırın, numunenin sıcaklığını korumak için sabit bir hızda yukarı veya aşağı ısıtılır ve referans aynıdır. Isı akışındaki farklılık, DSC izinde endotermik veya ekzotermik bir pik olarak görünen numunenin ve referansın ısı kapasitesindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır [103].

DSC, malzeme bilimi ve mühendislikte kritik bir analiz yöntemi olarak, hem termal özelliklerin incelenmesinde hem de üretim parametrelerinin optimize edilmesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Kompozit malzemelerin termal ve mekanik performansını anlamak için DSC verilerinin doğru yorumlanması, daha dayanıklı ve verimli malzeme tasarımı için temel bir katkı sağlar. Bu yöntem, malzeme geliştirme ve karakterizasyon süreçlerinde vazgeçilmez bir araçtır.

2.3.3. Basınç Etkisinin İncelenmesi

Kompozit malzemelerin üretim süreçlerinde, uygulanan basınç, malzeme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozit levhaların üretiminde kullanılan farklı basınç seviyelerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, üretim sırasında 10 bar, 20 bar ve 30 bar basınç seviyelerinde levha üretimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı basınç seviyelerinin, kompozit malzemelerin mekanik dayanımını ve mikroyapısal düzenini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Üretim sürecinde uygulanan basınç, lif-matris ara yüzey

bağlanmasının etkinliği, malzeme homojenliği ve boşluk (voids) oluşumu üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Basıncın artırılmasıyla, lif-matris ara yüzeyinde sıkı bir bağlanma sağlanabilirken, aşırı yüksek basınç seviyelerinin ara yüzey bağlanmasında olumsuz etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Bu bağlamda, uygun basınç seviyesinin belirlenmesi, hem malzeme dayanımı hem de üretim sürecinin verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır. Bu çalışma, uygulanan basınç seviyelerinin kompozit levhaların eğilme dayanımı üzerindeki etkisini anlamak ve optimum üretim parametrelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üretim süreçlerinde basınç parametresinin dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

2.3.4. Basınç Uygulama Süresinin Etkisinin İncelenmesi

Cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozit levhaların üretiminde uygulanan basınç süresinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı basınç seviyelerinde farklı sürelerde uygulanan presleme işlemi, kompozit levhaların mekanik özelliklerini ve mikroyapısal düzenini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, levhalar 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika sürelerle preslenmiş ve farklı sürelerin malzeme üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Basınç uygulama süresi, lif-matris ara yüzey bağlanmasının etkinliği, boşlukların (voids) miktarı ve kompozit malzemenin genel homojenliği üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha uzun süreli basınç uygulamalarının, matris malzemenin lifleri daha etkili bir şekilde sarmasına ve lif-matris bağlanmasını optimize etmesine olanak tanıdığı bilinmektedir. Ancak, süre arttıkça malzeme üzerinde oluşabilecek mikroyapısal değişimlerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, farklı sürelerde uygulanan basıncın kompozit malzemenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, üretim süreçlerinde basınç uygulama süresinin kritik bir parametre olduğunu ve optimum üretim koşullarının belirlenmesinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

3. BÖLÜM

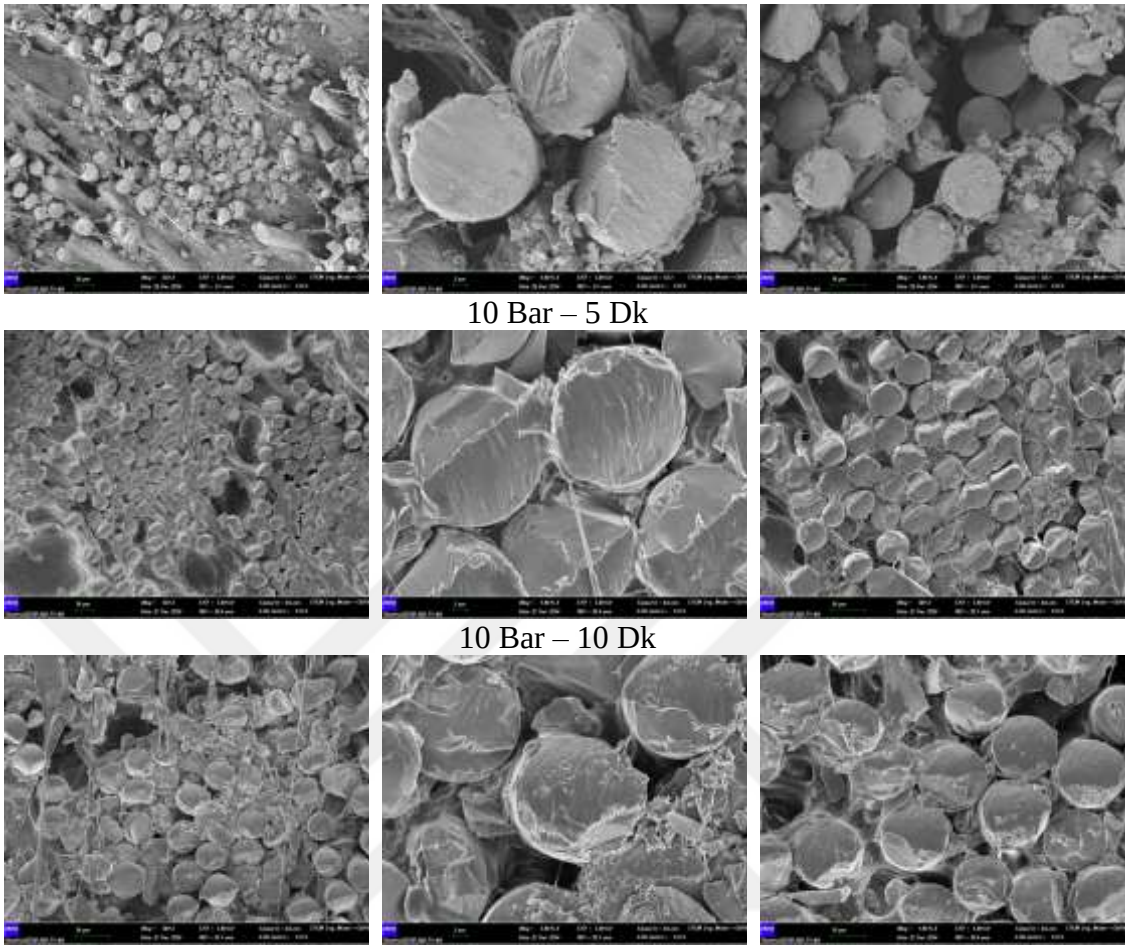
BULGULAR

3.1. Giriş

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar detaylı olarak sunulmuş ve yorumlanmıştır. Deney sonuçları, farklı üretim parametrelerinin termoplastik kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Eğilme dayanımı, kristalizasyon davranışı ve mikroyapısal analizler gibi temel bulgular karşılaştırmalı olarak ele alınarak yorumlanmıştır. Böylece, üretim sürecinde uygulanan basınç ve basınç altında bekletme süresinin kompozit malzemelerin performansına olan etkileri ortaya konulmuştur.

3.2.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

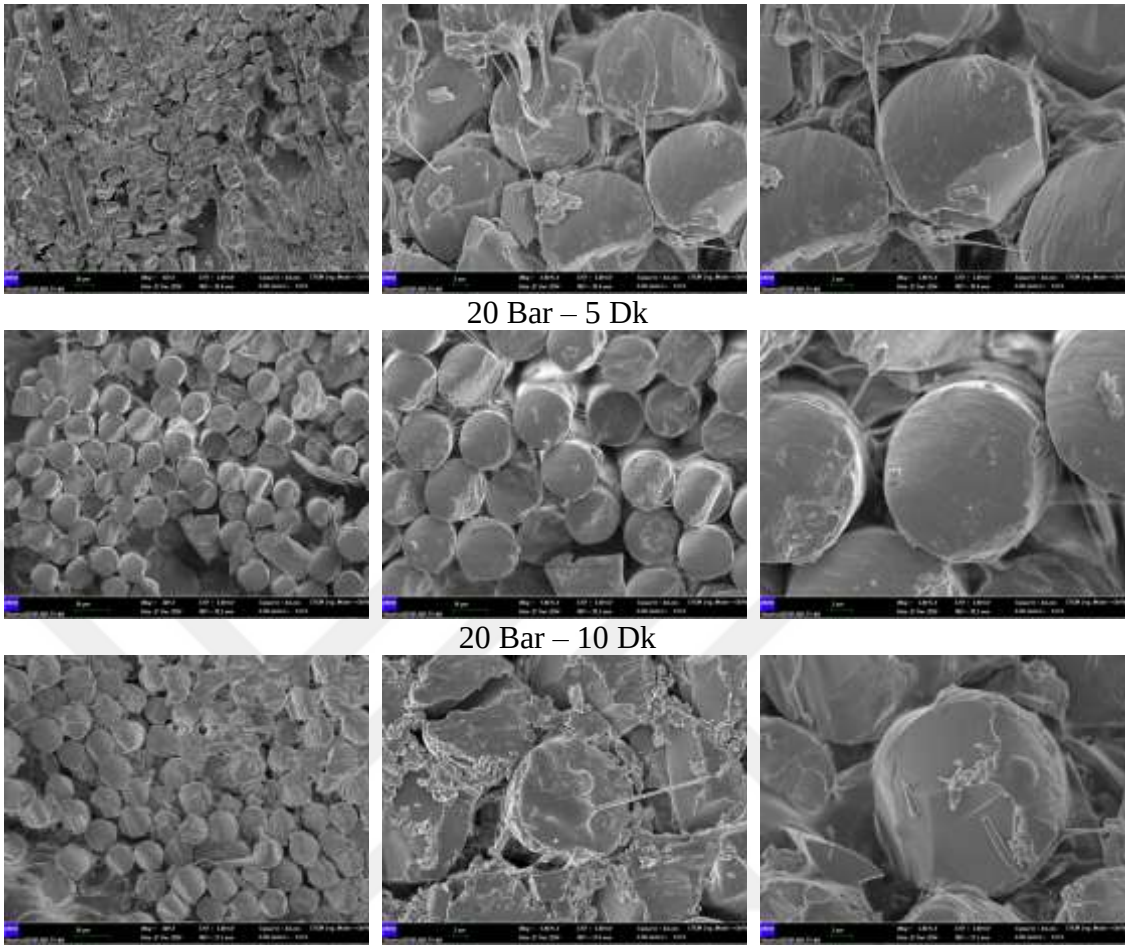
10 bar basınç seviyesinde farklı sürelerde (5, 10 ve 20 dakika) gerçekleştirilen üretim sürecinin kompozit malzemenin mikro yapısı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan SEM analizleri, basınç süresinin uzatılmasıyla birlikte lif-matris ara yüzeyinde daha homojen bir dağılım sağlandığını, boşluk miktarının azaldığını ve liflerin matris tarafından daha etkin bir şekilde sarıldığını göstermektedir. Düşük basınç süresinde (5 dakika) lif-matris etkileşimi zayıf olup, liflerin tam olarak matrisle bütünleşemediği ve belirgin boşlukların gözlemlendiği tespit edilmiştir. 10 dakikalık uygulamada, matrisin lifleri daha iyi ıslattığı ve ara yüzeydeki boşluk oranının kısmen azaldığı görülmektedir. Ancak en belirgin iyileşme, 20 dakikalık uygulamada meydana gelmiştir. 20 dakika boyunca uygulanan basınç süresi, matrisin viskozite özelliklerine bağlı olarak daha iyi bir akışkanlık sağlamış ve lif-matris etkileşimini güçlendirmiştir. Bu durum, mikro yapısal bütünlüğün iyileşmesini ve kompozit malzemenin daha iyi mekanik özellikler sergilemesini sağlamaktadır.



Şekil 3.1. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 10 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri

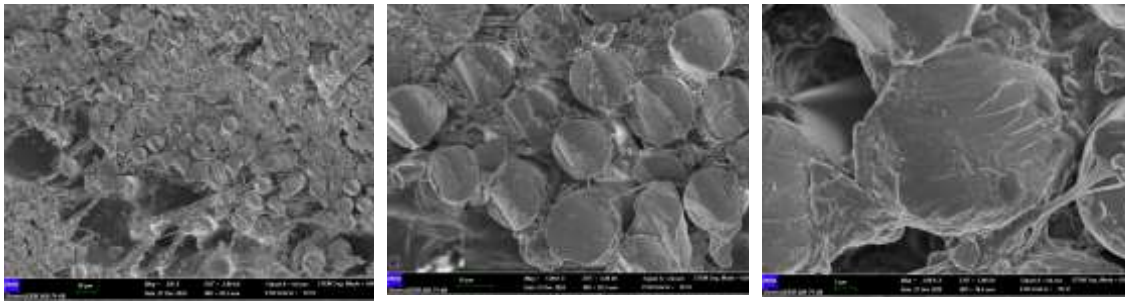
Sonuç olarak, 10 bar basınç seviyesinde süre arttıkça fiber-matris ara yüzeyindeki tutunumun geliştiği, boşluk miktarının azaldığı ve daha homojen bir mikro yapı elde edildiği belirlenmiştir. Bu veriler, optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi açısından önemli olup, kompozit malzemelerin mekanik dayanımını artırmada süre ve basınç ilişkisinin kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

20 bar basınç altında gerçekleştirilen farklı sürelerdeki üretim koşullarına ait SEM görüntüleri incelendiğinde, basınç uygulama süresinin fiber-matris ara yüzey etkileşimi ve mikroyapısal homojenlik üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. 5 dakika süreyle uygulanan basınç altında üretilen numunelerde, fiber-matris ara yüzeyinde belirgin boşluklar ve tam ıslanma eksiklikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 20 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri

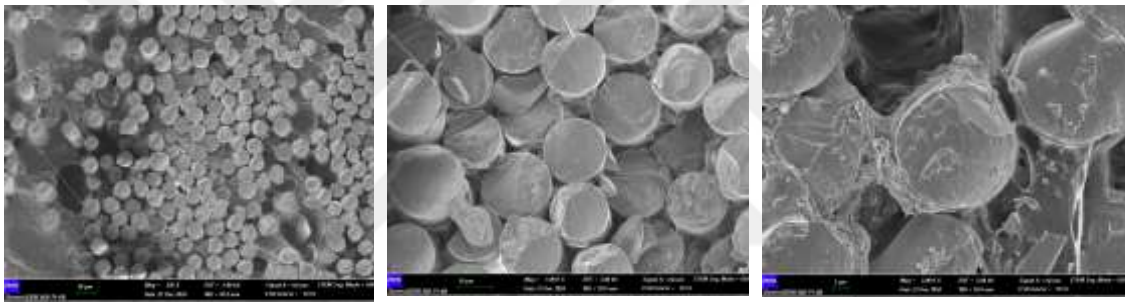
Bu durum, kısa süreli konsolidasyonun matris malzemenin lifleri yeterince sarmasını engellediğini ve mekanik bütünlük açısından zayıf bağlanmalara yol açtığını göstermektedir. Sürenin 10 dakikaya çıkarılmasıyla birlikte fiber-matris ara yüzeyinde daha homojen bir matris dağılımı gözlemlenmiş ve boşluk oranında azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde liflerin tamamen gömülmediği ve ara yüzeyde kısmi düzensizliklerin devam ettiği tespit edilmiştir. En uzun süreli basınç uygulaması olan 20 dakika koşulunda, fiber-matris etkileşiminin en yüksek seviyeye ulaştığı ve boşluk oranının minimum seviyeye indiği belirlenmiştir. Liflerin matris tarafından daha iyi sarıldığı ve ara yüzey bağlanmasının daha homojen hale geldiği görülmüştür.



30 Bar – 5 Dk



30 Bar – 10 Dk



30 Bar – 20 Dk

Şekil 3.3. 5, 10 ve 20 Dk basınç uygulama süresi altında ve 30 Bar basınç altında üretimi yapılan levhaların SEM görüntüleri

Ancak, uzun süreli basınç uygulamasının bazı bölgelerde lif deformasyonuna ve mikroyapısal bütünlükte lokal bozulmalara yol açabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, 20 bar basınç seviyesinde basınç süresi arttıkça fiber-matris bağlanmasının iyileştiği, ancak uzun süreli uygulamaların lif yapısında olası deformasyonlara neden olabilir.

30 bar basınç altında üretilen kompozit numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, basıncın artışıyla birlikte lif-matris ara yüzey etkileşiminde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. 30 bar 5 dakika süreyle uygulanan basınç sonucunda, liflerin belirli bölgelerde yeterli matris penetrasyonu sağlayamadığı ve mikroyapıda yüksek oranda boşlukların bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek basıncın kısa sürede uygulanmasının matris akışkanlığını kısıtlayarak lifler arasında tam ıslanmayı engellediğini ve mekanik dayanım açısından olumsuzluklara yol açabileceğini

göstermektedir. 30 bar 10 dakika süresince gerçekleştirilen üretimlerde, lif-matris ara yüzeyinde nispeten daha iyi bir dağılım sağlandığı ve boşluk oranının azaldığı görülmektedir. Matrisin lifleri daha iyi sardığı ancak bazı bölgelerde hâlâ belirgin boşlukların mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek basıncın matris akışkanlığı üzerindeki olumsuz etkisinin tam anlamıyla dengelenemediğini ortaya koymaktadır. 30 bar 20 dakika basınç uygulanan numunelerde, matrisin liflere daha etkin bir şekilde nüfuz ettiği, boşluk oranının önemli ölçüde azaldığı ve lif-matris ara yüzey bağlanmasının büyük ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir. Ancak, uzun süreli yüksek basınca maruz kalan liflerin yüzeyinde deformasyonların meydana geldiği ve yapısal bütünlüklerinin kısmen bozulduğu fark edilmiştir. Bu durum, mekanik dayanım açısından istenmeyen etkiler doğurabileceği gibi, lif-matris ara yüzeyindeki bağlanma kalitesini de etkileyebilir. Sonuç olarak, 30 bar basınç seviyesinde üretim süresi arttıkça boşluk miktarının azaldığı ve lif-matris etkileşiminin iyileştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek basıncın uzun süre uygulanması lif bütünlüğünde deformasyonlara yol açarak mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

Yapılan SEM analizleri, farklı basınç ve süre kombinasyonlarının cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin mikroyapısal bütünlüğü üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Genel olarak, basınç uygulama süresi arttıkça lif-matris ara yüzey etkileşiminin iyileştiği ve boşluk oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, uygulanan basınç seviyesinin artışıyla birlikte, belirli bir eşik değerinden sonra liflerde deformasyonun başladığı tespit edilmiştir.

Düşük basınç seviyelerinde (10 bar), özellikle 5 dakika süreyle uygulanan basınçta, liflerin matrise tam olarak tutunamadığı, ara yüzeyde boşlukların yoğun olduğu ve kompozit yapının heterojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Sürenin 10 ve 20 dakikaya çıkmasıyla birlikte, boşlukların azaldığı ve liflerin daha etkin bir şekilde matrise entegreolduğu görülmüştür. Orta seviyeli basınç (20 bar) altında, 5 dakika basınç uygulamalarında boşlukların azaldığı ancak tamamen giderilemediği tespit edilmiştir. 10 ve 20 dakika süreyle uygulanan 20 bar basıncında ise, lif-matris ara yüzey bağlanmasının güçlendiği, mikroyapısal bütünlüğün iyileştiği ancak belirli bölgelerde hala kısmi lif deformasyonlarının meydana geldiği görülmüştür.

En yüksek basınç seviyesi olan 30 bar altında, süre arttıkça boşlukların büyük ölçüde azaldığı ancak lif deformasyonlarının belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle 20 dakika süreyle uygulanan 30 bar basıncında, liflerin ezildiği, yapısal bütünlüklerinin bozulduğu ve lif-matris ara yüzeyindeki gerilim nedeniyle kırılgan bir yapı oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek basıncın boşlukları minimize etmesine rağmen, liflerin aşırı sıkışmasına neden olarak kompozitin mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

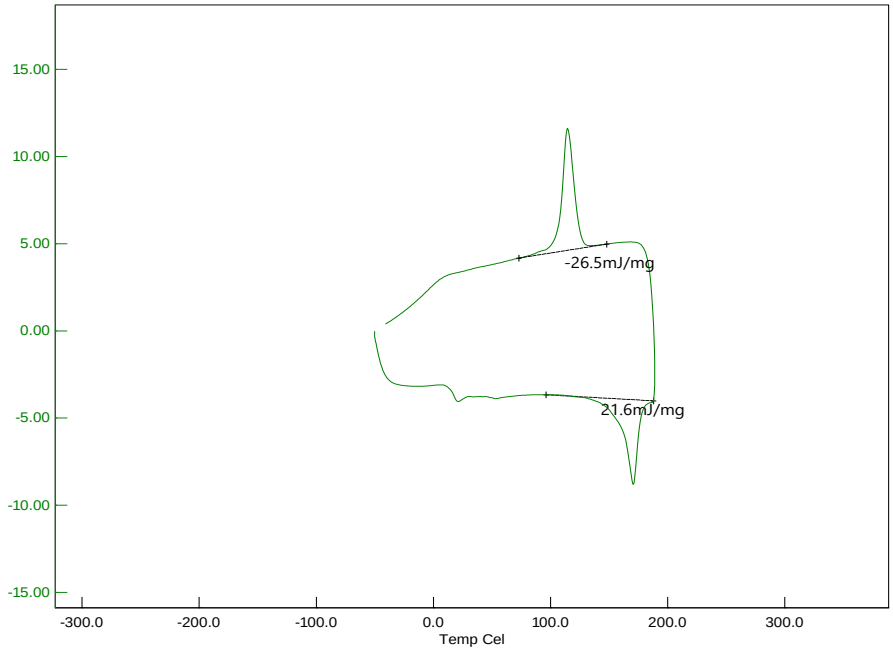
Sonuç olarak, SEM analizleri, basınç süresinin artırılmasının kompozit yapıda homojenliği artırdığı ve boşluk oranını düşürdüğünü ortaya koyarken, yüksek basınç seviyelerinin ise belirli bir noktadan sonra liflerde yapısal bozulmalara yol açtığını göstermektedir. Optimum üretim parametreleri açısından, 10 bar 20 dakika koşulu, en dengeli mikroyapısal yapı ve homojen dağılımı sağlayan üretim koşulu olarak değerlendirilmektedir.

3.3. DSC Testleri

Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizleri, farklı basınç ve süre koşulları altında üretilen numunelerin termal davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 5, 10 ve 20 dakika süreyle 10 bar, 20 bar ve 30 bar basınca maruz bırakılan numuneler arasındaki kristalleşme ve ergime davranışları karşılaştırılmıştır.

Plastiklerin özellikleri, Kristalleşme derecelerinden önemli ölçüde etkilenir. Kristalleşme, kristallerin oluşumu ve büyümesi sırasında sertleşmenin fiziksel sürecidir. Bu işlem sırasında kristalleşme ısısı açığa çıkar. Kristalleşme derecesi ne kadar yüksekse, kalıplanmış bir parça o kadar sert ve güçlüdür, ancak aynı zamanda daha kırılgandır. Kristalleşme derecesinin belirlenmesi için K, ölçülen erime entalpisi ΔHmeas, tamamen kristal malzeme için literatür değeri ΔHlit ile ilişkili olarak ayarlanır. Pik sıcaklıkları polimerlerin ve polimer karışımlarının tanımlanmasına yardımcı olur. Pik alanları erime entalpilerini temsil eder.

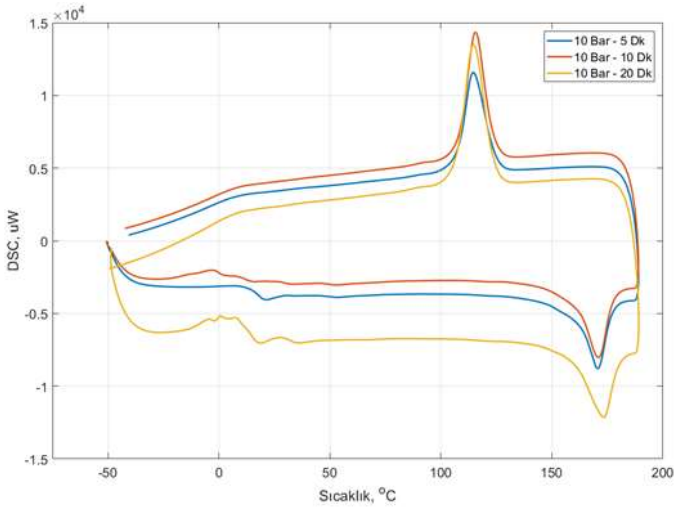
$$K = \frac{\Delta H_{meas}}{\Delta H_{lit}} \tag{3.1}$$



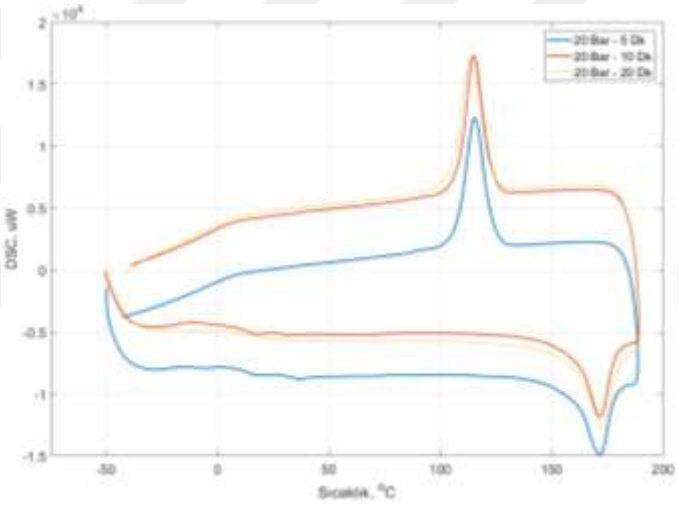
Şekil 3.4. DSC entalpi ölçüm örneği

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) testleri, farklı basınç ve süre kombinasyonları altında üretilen termoplastik kompozitlerin ısıl davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 10, 20 ve 30 bar basınç seviyelerinde, 5, 10 ve 20 dakika süreyle üretimi gerçekleştirilen numunelerin termal karakteristikleri incelenmiştir. DSC eğrileri, erime sıcaklıkları, kristalleşme pikleri ve termal kararlılık açısından değerlendirildiğinde, basınç ve süre değişiminin malzemenin termal özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

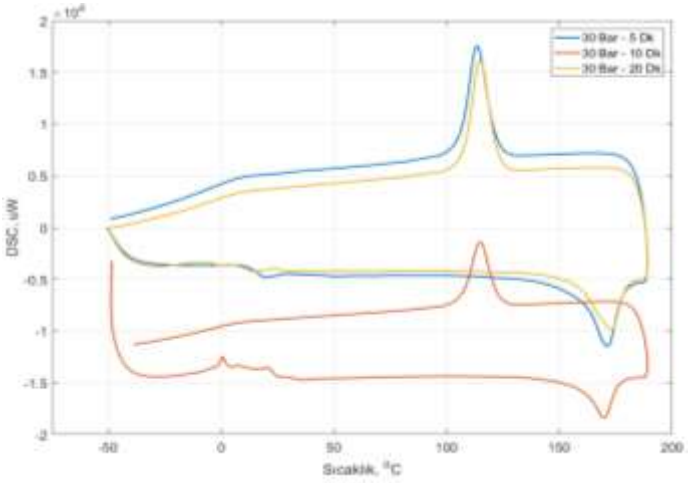
10 bar basınç altında üretilen numunelerde, erime piklerinin belirgin olduğu, ancak basınç uygulama süresi arttıkça kristalleşme eğrisinde daha düzgün bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. 5 dakika sürede üretilen numunede düzensiz bir termal davranış gözlemlenirken, 20 dakika süre ile üretilen numunenin daha homojen bir kristalleşme eğrisi sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, düşük basınç seviyelerinde sürenin artırılmasının matriks içindeki kristal büyümesine ve düzenlenmesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.



10 Bar



20 Bar

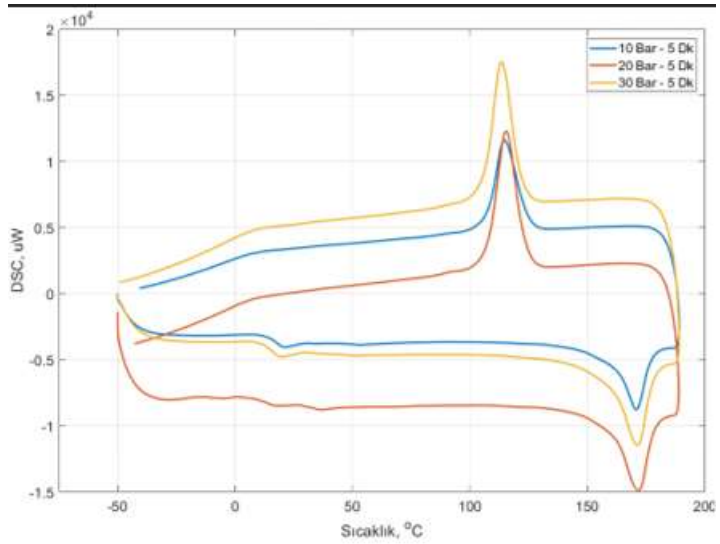


30 Bar

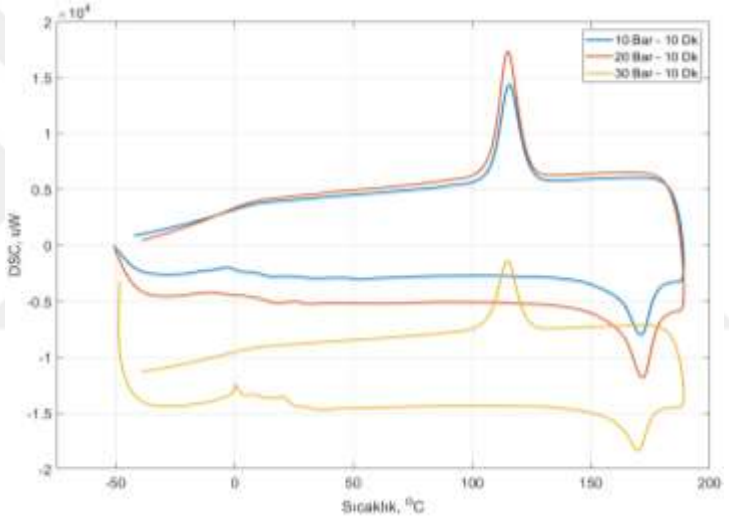
*Şekil 3.5.*10, 20 ve 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin DSC test sonuçları

20 bar basınç altında üretilen numunelerde, erime pikinin keskinliği ve yüksekliği, malzemenin daha yüksek oranda kristalleştiğini göstermektedir. Ancak, 5 dakika sürede üretilen numunede kristalleşme eksikliği nedeniyle düşük bir pik yoğunluğu gözlemlenirken, 10 ve 20 dakika sürede üretilen numunelerde erime ve kristalleşme sıcaklıklarının daha tutarlı olduğu belirlenmiştir. Bu durum, orta seviyedeki basınç değerlerinde sürenin artırılmasının, malzeme içindeki polimer zincirlerinin daha düzenli bir kristal yapı oluşturmasına yardımcı olduğunu göstermektedir.

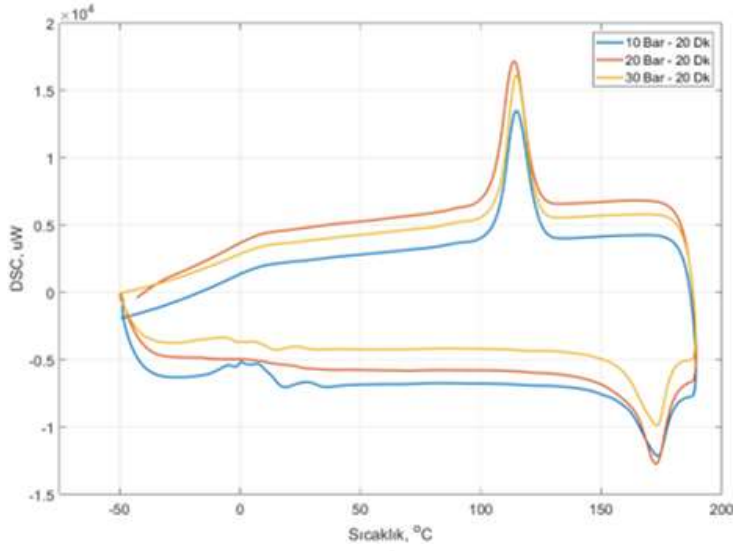
30 bar basınç altında üretilen numunelerde ise, özellikle 10 dakika sürede üretilen numunenin termal düzensizlik gözlemlenmektedir. Ancak, 5 ve 20 dakika sürede üretilen numunelerde homojenlik gözlemlenmiş olup, bu durum aşırı basıncın polimer zincirlerinin düzenli kristalleşmesini engelleyebileceğini göstermektedir. 30 bar 10 dakika basınç altında üretilen numune üretim koşullarına bağlı olarak termal düzensizlik sergilemiş, kristalleşme pikleri ve camsı geçiş sıcaklıklarında belirgin bir düzensizlik gözlemlenmiştir. Yüksek basınç seviyelerinde, özellikle uzun süreli uygulamalarda, matriksin fazla yoğunlaşarak polimer hareketliliğini kısıtladığı ve düzensiz bir termal davranış oluşturduğu tespit edilmiştir.



5 Dk



10 Dk



20 Dk

Şekil 3.6. 10, 20 ve 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin DSC test sonuçları

Elde edilen DSC analizleri doğrultusunda, 10 bar basınç altında 20 dakika süreyle üretilen numunenin en homojen kristalleşme yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, basınç seviyesinin yeterli düzeyde olması ve süre artışının polimer zincirlerinin daha düzenli hizalanmasına olanak tanıması ile açıklanabilir. DSC eğrisinde kristalleşme pikinin belirgin ve düzenli olması, polimer matrisinde homojen bir kristal yapının oluştuğunu göstermektedir. Daha kısa süreli basınç uygulamalarında düzensiz kristalleşme eğilimleri gözlemlenirken, süre arttıkça polimer zincirlerinin yeniden düzenlenme fırsatı bulduğu ve daha kararlı bir yapı kazandığı anlaşılmaktadır.

Öte yandan, 20 bar ve 30 bar basınç seviyelerinde özellikle uzun süreli basınç uygulamalarında, kristalleşme piklerinde düzensizlikler meydana gelmiştir. 30 bar basınç altında 20 dakika süreyle üretilen numunede polimer zincirlerinin aşırı sıkışması nedeniyle kristal yapıda düzensizlikler oluştuğu görülmektedir. Bu durum, aşırı basıncın polimer hareketliliğini kısıtlayarak istenmeyen iç gerilimlere yol açabileceğini ve homojenliği olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Tüm grafiklerde düşük sıcaklıklarda ekzotermik bir geçiş gözlemlenirken, yaklaşık 100-150°C aralığında keskin bir endotermik pik görülmektedir. Bu pik, malzemelerin ergime sıcaklığını temsil etmekte olup, uygulanan basınca ve süreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. 5 dakika boyunca uygulanan basınçta, 30 barlık numune en yüksek entalpi değerine sahip olup, bu durum yüksek basıncın polimer zincirlerinin sıkışmasını artırarak kristalleşme derecesini etkileyebileceğini göstermektedir. Ancak, 10 ve 20 dakika boyunca uygulanan basınçlarda 10 bar ve 20 bar arasındaki farkın daha az olduğu, 30 barlık numunenin ise daha düzensiz bir kristalleşme profili sergilediği görülmektedir.

Basınç süresi arttıkça (5 dakikadan 20 dakikaya), 10 bar ve 20 bar altında üretilen numunelerde daha homojen bir kristalleşme eğilimi gözlemlenirken, 30 barlık numunede belirgin bir yapısal düzensizlik ve olası iç gerilmeler nedeniyle farklılaşan bir termal davranış tespit edilmiştir. Ergime sıcaklıkları ve entalpi değişimleri incelendiğinde, 10 bar 20 dakika sürede işlenen numunenin dengeli ve homojen bir kristalleşmeye sahip olduğu söylenebilir.

3.3.1. Kristalizasyon Değerlendirmesi

Tablo 3.1'de, farklı üretim parametreleri altında üretilen GFRPP prepreg kompozit malzemelerin DSC analizi ile elde edilen ölçülen entalpi değerleri ve bu değerlerin teorik entalpi değerine oranı kullanılarak hesaplanan kristalizasyon oranlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan basınç ve basınç altında bekleme süresinin malzemenin kristalizasyon davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Literatürden alınan PP için teorik entalpi değeri 207 J/g'dır.

Ölçülen entalpi değerleri incelendiğinde, genel olarak basınç seviyesinin artmasıyla birlikte entalpi değerlerinde belirgin bir değişiklik olduğu gözlemlenmiştir. 10 bar altında üretilen numunelerde kristalizasyon oranlarının nispeten daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1. Teorik-Deneysel Entalpi oranları

Levha kodu	Ölçülen Entalpi (J/g)	Teorik Entalpi (J/g)	Oran	Yüzde(%)
10B5D	21,6	207	0,104348	10,43478
10B10D	21,3	207	0,102899	10,28986
10B20D	20,4	207	0,098551	9,855072
20B5D	23,4	207	0,113043	11,30435
20B10D	21,5	207	0,103865	10,38647
20B20D	22,9	207	0,110628	11,0628
30B5D	24,7	207	0,119324	11,93237
30B10D	18,9	207	0,091304	9,130435
30B20D	22,9	207	0,110628	11,0628

Farklı sürelerde uygulanan basınç etkileri karşılaştırıldığında, 10 bar basınç ile üretilen numunlerin basınç altında bekleme süresi arttıkça kristalizasyon oranında düşüş gözlemlenmiştir (10B5D: %10,43 → 10B20D: %9,85). 20 bar ve 30 bar altında üretilen numunelerde ise süreye bağlı olarak belirgin bir değişim gözlenmemekle birlikte, genellikle 10 dakika basınç altında kalan numunelerin kristalizasyon üzerinde optimal bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar, polipropilen matrisli kompozitlerde üretim parametrelerinin kristalizasyon derecesini önemli ölçüde etkileyebileceğini ve uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinin malzeme performansı açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Kristalizasyon oranının düşmesi, malzemenin amorf faz içeriğinin arttığını ve kristalin yapı oluşumunun azaldığını gösterir. Kristalizasyon oranı sıfıra yaklaştıkça, malzemenin

daha amorf bir hale geldiği anlamına gelir. Ancak bu, mekanik özellikler açısından her zaman istenilen bir durum olmayabilir. Eğer malzemenin esneklik, darbe dayanımı ve işlenebilirliği ön plandaysa, daha düşük kristalizasyon oranı tercih edilebilir. Ancak, mekanik mukavemetin, sıcaklık direncinin ve boyutsal stabilitenin önemli olduğu uygulamalarda, daha yüksek kristalizasyon oranları daha avantajlı olabilir.

3.4. Eğilme testleri

GFRPP malzemesi ile geliştirilen levhalarda eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar matris polimeri olan polipropilen ve cam elyaf ile geliştirilen levhalarda üretimdeki parametrelerin değişiminin materyalin mekanik özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Denklem 3.2, 3.3 ve 3.3 3 nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet yer değiştirme eğrilerinden hesaplanan eğilme gerilmesi, eğilme şekil değiştirmesi ve eğilme elastik modülü denklemlerini vermektedir.

Eğilme Gerilmesi:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{3.2}$$

Eğilme Şekil Değiştirmesi:

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \tag{3.3}$$

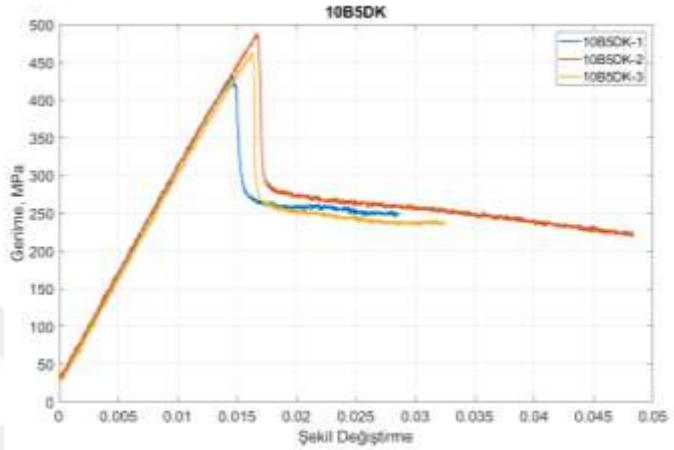
Eğilme Elastiklik Modülü

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \tag{3.4}$$

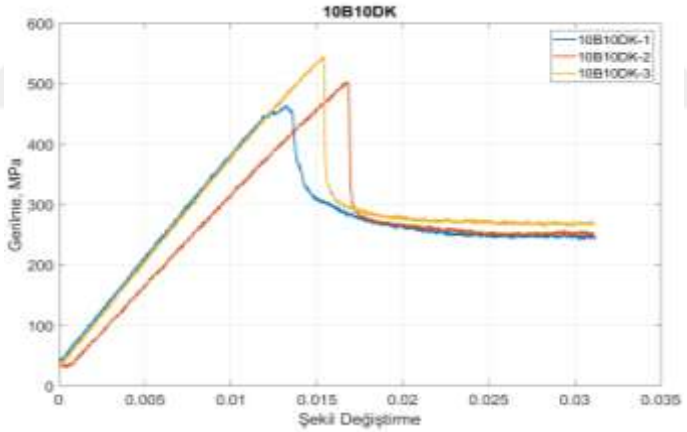
Denklemlerde, σ numunenin orta noktasında dış liflerdeki gerilmeyi, P yük-sapma eğrisi üzerindeki belirli bir noktaya karşılık gelen yükü, L destek açıklığını, b test edilen kirişin genişliğini ve d test edilen kirişin derinliğini ifade eder. ε değişkeni dış yüzeydeki şekil değiştirmeyi gösterirken, D kirişin merkezindeki maksimum sapmayı temsil eder. E_B eğilmede elastikiyet modülüdür.

Şekil 3.7 10 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları göstermektedir. 10 bar basınç altında üretilen numunelerin üç nokta eğme testleri incelendiğinde, basınç süresinin artışıyla birlikte maksimum gerilme değerlerinde artış gözlemlenmektedir. 5 dakika boyunca

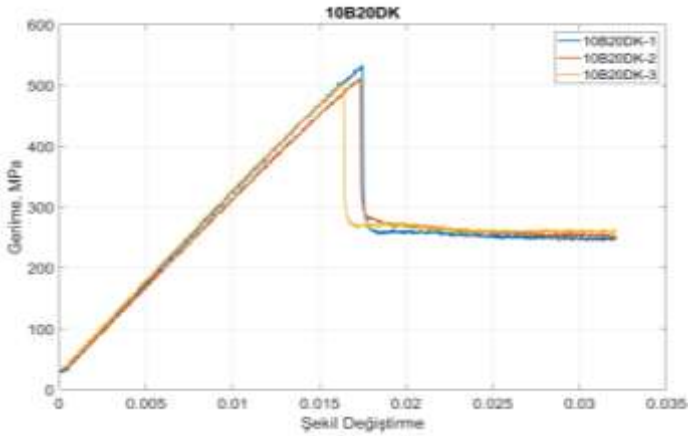
uygulanan basınç altında üretilen numunelerde maksimum gerilme değeri yaklaşık 450 MPa seviyelerinde ölçülmüş ve kırılma sonrası gerilme seviyesi hızlı bir şekilde azalmıştır. 10 dakikalık basınç uygulamasında ise numunelerin gerilme değerlerinde artış görülmüş ve gerilme değerleri yaklaşık 500 MPa seviyelerine kadar ulaşmış, ancak bazı numunelerde ani kırılmalar devam etmiştir. 20 dakika boyunca uygulanan basınç süresi,



t=5 dk



t=10 dk

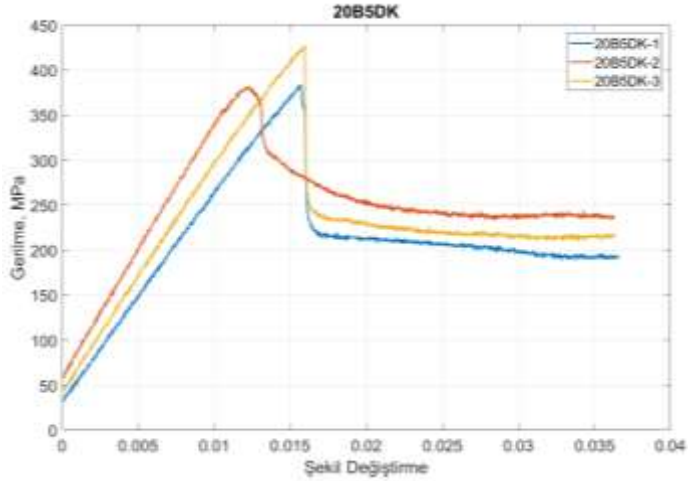


t=20 dk

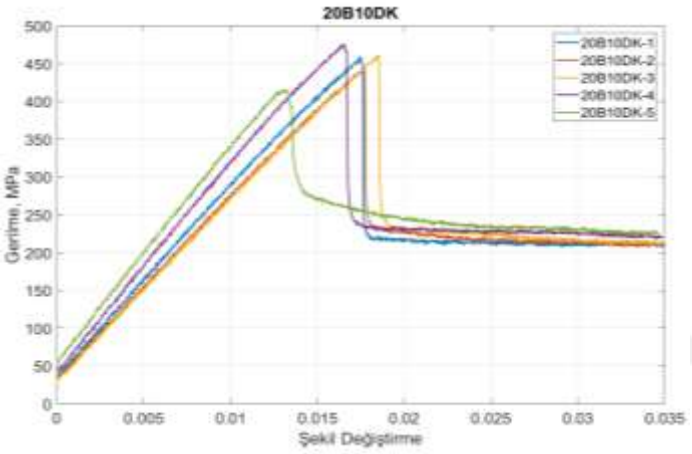
Şekil 3.7. 10 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları

en yüksek maksimum gerilme değerlerinin elde edilmesini sağlamış ve maksimum gerilme değeri yaklaşık 520 MPa seviyelerine kadar çıkmıştır. Kırılma sonrası yük taşıma kapasitesinin daha stabil olduğu gözlemlenmiştir. Sürenin artışıyla birlikte, malzemenin mekanik dayanımında iyileşme sağlandığı, ancak belirli yük seviyelerinde ani kırılma davranışlarının devam ettiği görülmektedir.

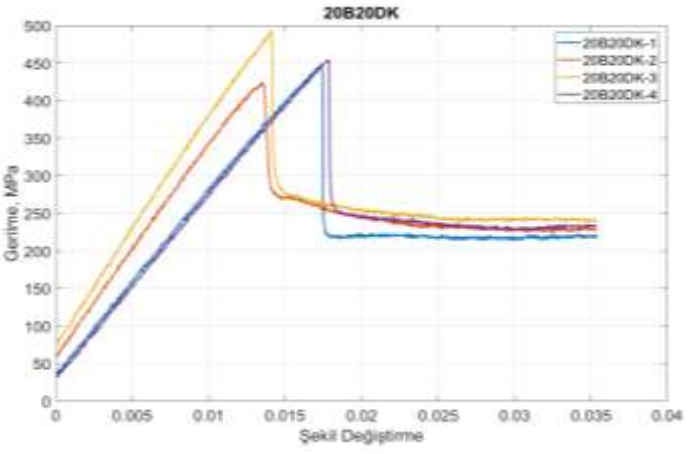
Şekil 3. 8. 20 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçlarını göstermektedir. 20 bar basınç altında üretilen numunelerin üç nokta eğme testleri incelendiğinde, 5 dakika boyunca uygulanan basınç altında üretilen numunelerde maksimum gerilme değeri yaklaşık 350-400 MPa aralığında gözlemlenmiştir. Eğme dayanımı açısından farklı numuneler arasında belirgin varyasyonlar görülmektedir. Numunelerin kırılma noktaları incelendiğinde, bazı numunelerin diğerlerine göre daha erken deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır.10 dakika boyunca uygulanan basınç altında üretilen numuneler daha yüksek mekanik performans sergilemiş ve maksimum gerilme değerleri 450 MPa civarına kadar çıkmıştır.



t=5 Dk



t=10 Dk



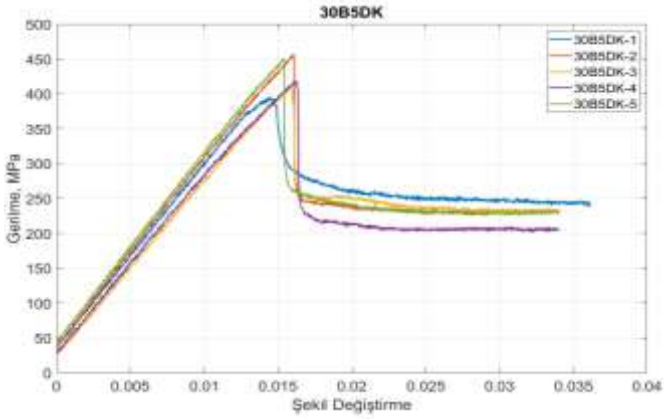
t=20 Dk

Şekil 3.8. 20 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları

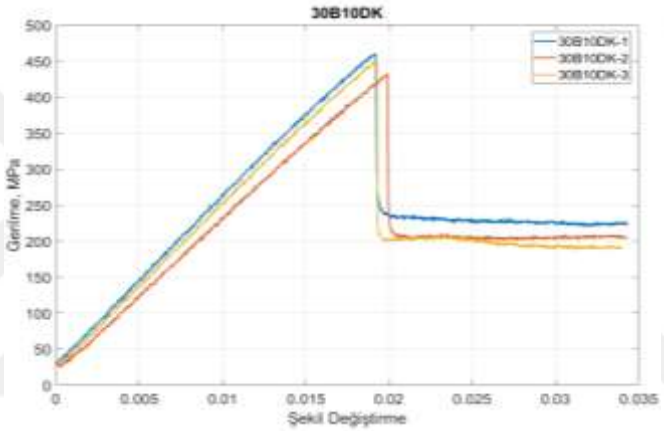
Numuneler arasında tutarlılık artmış ve kırılma sonrası deformasyonun daha stabil olduğu görülmüştür. Bu süre boyunca uygulanan basıncın, lif-matris etkileşimini iyileştirdiği ve numuneler arası tutarlılığı artırdığı söylenebilir. 20 dakika boyunca uygulanan basınç

altında üretilen numuneler, en yüksek eğilme dayanımına ulaşmış ve maksimum gerilme değeri yaklaşık 500 MPa civarında gerçekleşmiştir. Eğilme test sonuçları, numunelerin daha rijit bir yapıya sahip olduğunu ve kırılma anında daha yüksek bir mekanik direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak, belirli numunelerde ani gerilme düşüşleri gözlemlenmiş olup, bu durum üretim sürecindeki mikro yapısal değişimlere bağlı olabilir. Numuneler arasında bazı farklılıklar gözlemlenmiş olup, bu durum üretim sürecinde oluşabilecek mikroyapısal heterojenliklere işaret edebilir. Özellikle 20 dakika boyunca basınca maruz kalan numunelerde daha tutarlı ve yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir, bu da uzun süreli basınç uygulamasının malzeme performansına olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

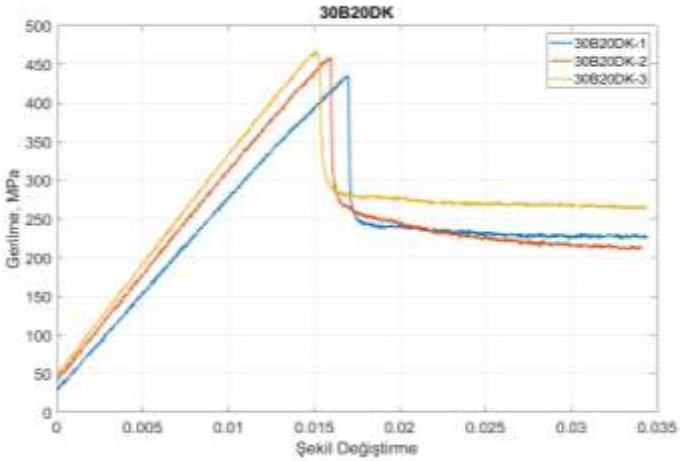
Şekil 3.9 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçlarını göstermektedir. 30 bar basınç altında



t=5 Dk



t=10 Dk



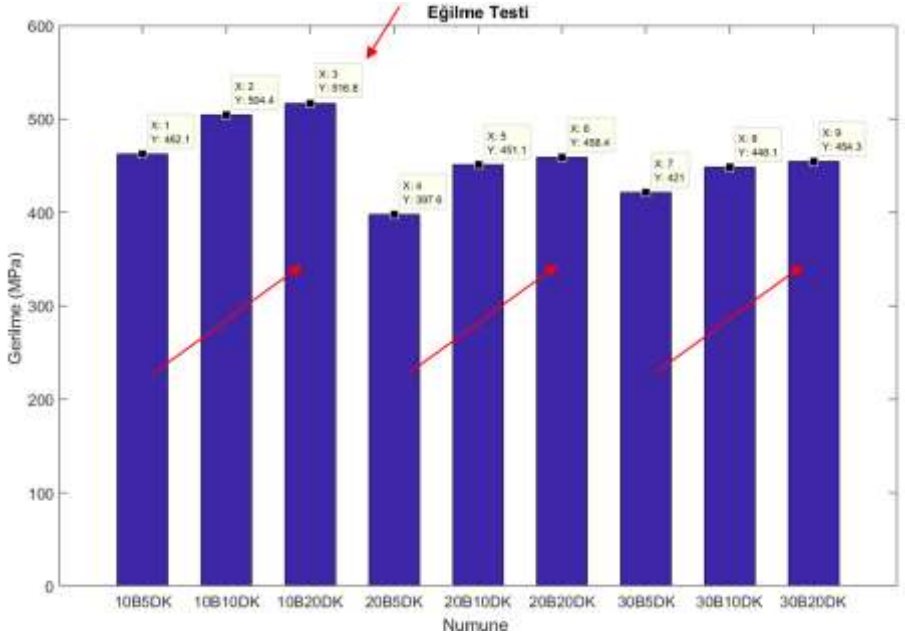
t=20 Dk

Şekil 3.9. 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları

üretilen numunelerin 3 nokta eğme test sonuçları incelendiğinde, eğilme dayanımı ve mekanik davranış üzerindeki etkiler belirgin hale gelmiştir. 5 dakika süreyle üretilen numunelerde maksimum gerilme değerinin yaklaşık 450 MPa seviyelerine ulaştığı, ancak

numuneler arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. 10 dakika süreyle üretilen numunelerde ise maksimum gerilme değeri yaklaşık 470 MPa seviyesine yükselmiş olup, daha homojen bir mekanik davranış sergilendiği gözlemlenmiştir. 20 dakika süreyle üretilen numunelerde ise mekanik dayanımın MPa 460 seviyelerinde olduğu, ancak deformasyon sonrası yük taşıma kapasitesinin düzensiz olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak, 30 bar basınç altında üretilen numunelerde basınç uygulama süresinin artmasıyla birlikte malzemenin mukavemetinin belli bir noktaya kadar arttığı, ancak yüksek sürelerde lif-matris etkileşiminin aşırı yoğunlaşarak gevrek bir yapı oluşmasına



Şekil 3.10. Farklı üretim parametrelerine ait termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları

neden olabileceği gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun süreli basınç uygulamasının mekanik dayanım açısından belirli bir noktaya kadar avantaj sağladığını, ancak optimum sürenin aşılması durumunda malzemenin kırılgan hale gelebileceğini göstermektedir.

Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre, 10 bar basınç altında üretilen numuneler, maksimum 520 MPa seviyelerine ulaşırken, özellikle 5 dakika süreyle üretilen numunelerde ani gerilme düşüşleri gözlemlenmiştir. 20 dakika süreyle üretilen numunelerde, yük taşıma kapasitesinin daha stabil olduğu belirlenmiştir. 20 bar basınç altında üretilen numunelerde, maksimum gerilme 500 MPa seviyelerine ulaşmış, özellikle 10 ve 20 dakika süreyle üretilen numunelerde lif-matris etkileşiminin daha iyi olduğu ve

sünek davranış sergilendiği görülmüştür. 5 dakika süreyle üretilen numunelerde ise yetersiz konsolidasyon nedeniyle ani gerilme kayıpları yaşanmıştır. 30 bar basınç altında üretilen numunelerde, maksimum gerilme 450-470 MPa arasında değişmiş, 10 dakika süreyle üretilen numuneler yüksek gerilme değerleri gösterirken, 20 dakika süreyle üretilen numunelerde kırılganlık artmıştır. Yüksek basınç nedeniyle lif deformasyonu ve mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.

10 bar 20 dakika süreyle üretilen numuneler en iyi eğilme dayanımını gösterirken, düşük süreli üretimler yetersiz mekanik performans sergilemiştir. Yüksek basınç ve uzun süre kombinasyonu ise kırılgan yapıya neden olmuştur.

Şekil 3.10 farklı üretim parametrelerine ait termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları göstermektedir. Grafikte farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları gösterilmektedir. 10 bar basınç altında üretilen numuneler, 20 ve 30 bar altında üretilenlere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı sergilemiştir. Özellikle 10 bar 20 dakika süresiyle üretilen numuneler, en yüksek eğilme dayanımına (~520 MPa) ulaşarak optimum mekanik performansı göstermektedir. 20 bar basınç altında üretilen numuneler, genel olarak 10 bar numunelere yakın sonuçlar verse de, 20 dakika süresi boyunca uygulanan basınçta düşük performans eğilimi görülmektedir. 30 bar basınç altında üretilen numunelerde, artan basınç nedeniyle mikro yapı deformasyonları ve lif-matris ayrışması nedeniyle eğilme dayanımı azalmıştır. En düşük eğilme dayanımı 30 bar 20 dakika süresiyle üretilen numunede (~460 MPa) görülmektedir.

Genel olarak, orta seviyede basınç ve uzun süre kombinasyonunun (10 bar - 20 dakika) en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu, aşırı basınç artışının ise lif deformasyonu ve kırılgan yapı oluşturarak mekanik dayanımı olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1.Tartışma

Bu çalışma kapsamında, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerine farklı basınç seviyeleri ve basınç uygulama sürelerinin etkileri incelenmiştir. Yapılan Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri, 10, 20 ve 30 bar basınç seviyelerinde ve 5, 10 ve 20 dakika süre ile üretimi yapılan numunelerin kristalizasyon davranışını ortaya koymuştur. Aynı zamanda 3 nokta eğme testleri ile kompozitlerin mekanik dayanımları belirlenmiştir.

DSC analizleri sonucunda, basınç ve süre artışına bağlı olarak kristalizasyon entalpisi üzerinde belirgin değişimler gözlemlenmiştir. 10 bar basınç seviyesinde, 20 dakika uygulanan basıncın daha homojen bir kristalizasyon sağladığı gözlenirken, 30 bar basınç seviyesinde 10 dakika süre ile üretim yapılan numunelerde düzensiz kristalizasyon meydana gelmiştir. 20 bar basınç seviyesinde 20 dakika süre ile üretim yapılan numunelerde ise kristalizasyon entalpisi oranlarının daha stabil olduğu gözlenmiştir.

3 nokta eğme testleri sonucunda, en yüksek gerilme değerine 10 bar basınç ve 20 dakika süre ile üretimi yapılan numunenin ulaştığı belirlenmiştir. Bu durum, üretilen numuneler içinde optimal basınç ve süre kombinasyonunun 10 bar ve 20 dakika olduğuna işaret etmektedir. 30 bar basınç seviyesinde ise üretim sürelerinin artışı ile malzemenin mekanik dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuç, aşırı basıncın kompozit yapılarda lif-matris ara yüzey bağlanmasını olumsuz etkileyerek zayıf noktalara neden olabileceğini göstermektedir.

4.2.Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin üretim parametrelerinden nasıl etkilendiğini ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, malzeme iç yapısının optimize edilmesi için basınç ve süre parametrelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini göstermiştir.

Optimum üretim parametresi olarak, 10 bar basınç ve 20 dakika süre ile üretim yapılan numunelerin hem düşük kristalizasyon düzeni hem de en yüksek eğilme dayanımını sunduğu belirlenmiştir. Daha yüksek basınç seviyelerinde (örneğin 30 bar), malzeme içinde boşluk ve yapısal düzensizliklerin arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle, havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda 10 bar basınç seviyesinde üretim tercih edilmelidir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için, farklı elyaf oranlarının ve matris malzeme türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, nano-dolgu malzemeleri eklenerek mekanik dayanımın iyileştirilmesi ve kompozit yapının homojenliğinin artırılması üzerine çalışmalar yapılabilir. Bu çalışma, kompozit malzemelerin üretim süreçlerini optimize etmek için bilimsel bir temel oluşturmuş olup, endüstriyel uygulamalar için önemli katkılar sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

1. Campbell, F. C. 2010. Structural Composite Materials. ASM International, 14.
2. Gündoğan, K., Özsarı, A. R. B., 2019. Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen AA2024 ve AA6061 matrisli, B4C ve SiC takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı, mekanik ve ısıl iletkenlik özelliklerine basıncın etkisi. **International Journal of Engineering Research and Development**, **11(2),** 657-669.
3. Singh, S., Uddin, M., Prakash, C., 2022. Introduction, history, and origin of composite materials, s. 1-18. In: Fabrication and machining of advanced materials and composites (Eds: Singh, S., Uddin, M., Prakash, C.). CRC Press
4. Diniță, A., Ripeanu, R. G., Ilincă, C. N., Cursaru, D., Matei, D., Naim, R. I., Portoacă, A. I. (2023). Advancements in fiber-reinforced polymer composites: a comprehensive analysis. **Polymers**, **16(1)**, 2.
5. Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, 327 s.
6. Bielawski, R., 2017. Composite materials in military aviation and selected problems with implementation. **Review of the Air Force Academy, (1),** 11.
7. Starke Jr, E. A., Staley, J. T., 1996. Application of modern aluminum alloys to aircraft. **Progress in Aerospace Sciences, 32(2-3),** 131-172.
8. Yılmaz, U., Evci, C., 2015. Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği. **Savunma Bilimleri Dergisi, 14(2)**, 77-109.
9. Amir, S. M. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Ariffin, A. H., Mohd, S., Salleh, K. A. M., ... Shah, A. U. M., 2019. Nondestructive testing method for Kevlar and natural fiber and their hybrid composites, s. 367-388. *In:* Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites (Eds: M. Jawaid, M.T.H. Sultan, O.Y. Alothman). Woodhead Publishing.
10. El-Aouni, N., Hsissou, R., El Azzaoui, J., El Bouchti, M., Elharfi, A**.**, 2020. Synthesis rheological and thermal studies of epoxy polymer and its composite. **Chemical Data Collections, 30,** 100584.
11. İşmal, Ö. E., Paul, R., 2018. Composite textiles in high-performance apparel, s. 377-420. *In:* High-Performance Apparel (Eds: J. McLoughlin, T. Sabir). Woodhead Publishing.

12. Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A., 2021. Polymer composite materials: a comprehensive review. **Composite Structures, 262**, 113640.
13. Sarde, B., Patil, Y. 2019. Recent research status on polymer composite used in concrete-an overview. **Materials Today: Proceedings, 18**, 3780-3790.
14. Xian, G., Bai, Y., Zhou, P., Wang, J., Li, C., Dong, S., Guo, R., Tian, J., Li, J., Zhong, J. 2024. Long-term properties evolution and life prediction of glass fiber reinforced thermoplastic bending bars exposed in concrete alkaline environment. **Journal of Building Engineering, 91**, 109641.
15. Morici, E., Dintcheva, N. T., 2022. Recycling of thermoset materials and thermoset-based composites: challenge and opportunity. **Polymers, 14(19)**, 4153.
16. Ashby, M. F., Jones, D. R., 2012. Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design. 4. Baskı, Butterworth-Heinemann, 480 s.
17. Mitschang, P., Blinzler, M., Wöginger, A., 2003. Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends. **Composites Science and Technology, 63(14),** 2099-2110.
18. Gopanna, A., Rajan, K. P., Thomas, S. P., Chavali, M., 2019. Polyethylene and polypropylene matrix composites for biomedical applications, s. 175-216. *In:* Materials for Biomedical Engineering (Eds: A. M. Grumezescu, A. M. Holban). Elsevier.
19. Chen, L., Lin, Z., 2021. Polyethylene: properties, production and applications, s. 1191-1196. In: 2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST). IEEE.
20. Ronca, S. (2017). Polyethylene. *In*: Brydson's plastics materials (pp. 247-278). Butterworth-Heinemann.
21. Patel, R. M., 2016. Polyethylene, s. 17-34. *In:* Multilayer Flexible Packaging (Ed: John R. Wagner, Jr.). William Andrew Publishing.
22. Adeniyi, A. G., Abdulkareem, S. A., Emenike, E. C., Abdulkareem, M. T., Iwuozor, K. O., Amoloye, M. A., Ahmed, I. I., Awokunle, O. E. 2022. Development and characterization of microstructural and mechanical properties of hybrid polystyrene composites filled with kaolin and expanded polyethylene powder. **Results in Engineering, 14**, 100423.

23. Yao, Z., Seong, H. J., Jang, Y. S., 2022. Environmental toxicity and decomposition of polyethylene. **Ecotoxicology and Environmental Safety, 242**, 113933.

24. Watanabe, R., Hagihara, H., Sato, H. 2018. Structure-property relationships of polypropylene-based nanocomposites obtained by dispersing mesoporous silica into hydroxyl-functionalized polypropylene. Part 1: toughness, stiffness and transparency. **Polymer Journal, 50(11)**, 1057-1065.

25. Karger-Kocsis, J., Bárány, T., 2019. Polypropylene Handbook. Switzerland: Springer Nature, 641 s.

26. Karadeniz, E., 2006. Poliamid/Polipropilen (PA/PP) Karışımlarının Yapı ve Özellikleri. Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 126 s.

27. Smith, V., William, F., 1990. Material Science and Engineering. (N. Kınıkoğlu, çev.) Ankara: Literatür Yayıncılık. (Orijinal çalışma basım tarihi 1990)

28. Foltz, J. V., Blackmon, C. M., 1990. Metal-Matrix Composites, s. 903-912. In: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials (Ed: Joseph R. Davis). ASM International.

29. Mazumdar, S., 2001. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press, 416 s.

30. Uygur, İ. U., Saruhan, H. A. M. İ. T., 2004. Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. **Sakarya University Journal of Science, 8(1),** 167-174.

31. Bharat, N., Bose, P. S. C., 2022. An overview of production technologies and its application of metal matrix composites. **Advances in Materials and Processing Technologies, 8(2)**, 1946-1962.

32. Kalemtaş, A., 2014. Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. **Putech Composites, 22,** 18-30.

33. Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E., 2015. Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. **Mühendis ve Makina, 56(669),** 36-47.

34. Öztürk, A., Cavcar, M. M., Yıldır, İ. H. (1995). Seramik matris kompozitlerin üretimi.

35. Matthews, F. L., Rawlings, R. D., 1999. Composite Materials: Engineering and Science. Woodhead Publishing, 470 s.

36. Kalemtaş, A., 2015. Seramik matrisli kompozit malzemeler. **Putech Composites, 21,** 20-26.
37. Alwekar, S., Ogle, R., Kim, S., Vaidya, U., 2021. Manufacturing and characterization of continuous fiber-reinforced thermoplastic tape overmolded long fiber thermoplastic. **Composites Part B: Engineering, 207**, 108597.
38. Bijwe, J., Indumathi, J., Ghosh, A. K., 2002. On the abrasive wear behaviour of fabric-reinforced polyetherimide composites. **Wear, 253(7-8),** 768-777.
39. Görgün, D. E., Kumartaşlı, S., Avinc, O., Atar, N., 2021. Boron fibers and their applications. 12. Uluslararası Tekstil Bilimi ve Ekonomisi Konferansı Bildirileri, 56.
40. Gaulé, G. K., Breslin, J. T., Pastore, J. R., Shuttleworth, R. A., 1960. Optical and electrical properties of boron and potential application, s. 159-174. In: Kohn, J. A., Nye, W. F., Gaulé, G. K. (Eds.), Boron Synthesis, Structure, and Properties: Proceedings of the Conference on Boron. Springer US, Boston, MA, 189 s.
41. Strong, A. B., 2008. Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications. Society of Manufacturing Engineers, 640 s.
42. Borates Today Limited, 2021. Boron fiber-high performance technology. Science, Applications**. https://borates.today/boron-fiber/**. (Erişim tarihi: 2 Kasım 2021).
43. Specialty Materials, 2021. Boron fiber. Erişim adresi: **https://www.specmaterials.com/boron-fiber-test-page** (Erişim tarihi: 25 Ekim 2021).
44. Paiva, J. M. F. D., Mayer, S., Rezende, M. C., 2006. Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites. **Materials Research, 9**, 83-90.
45. Guo, R., Li, C., Niu, Y., Xian, G., 2022. The fatigue performances of carbon fiber reinforced polymer composites–a review. **Journal of Materials Research and Technology, 21,** 4773-4789.
46. Ai, P., Feng, P., Lin, H., Zhu, P., Ding, G., 2021. Novel self-anchored CFRP cable system: Concept and anchorage behavior. **Composite Structures, 263**, 113736.
47. Omrani, E., Barari, B., Moghadam, A. D., Rohatgi, P. K., Pillai, K. M., 2015. Mechanical and tribological properties of self-lubricating bio-based carbon-fabric epoxy composites made using liquid composite molding. **Tribology International, 92,** 222-232.

48. Kukreja, K., Panda, P. K., 2024. Aramid fiber, its composites and applications, s. 61-99. In: Synthetic and Mineral Fibers, Their Composites and Applications (Eds: Mavinkere Rangappa, S., Ayyappan, V., Manik, G., Siengchin, S.). Woodhead Publishing.

49. Mittal, G., Rhee, K. Y., Mišković-Stanković, V., Hui, D., 2018. Reinforcements in multi-scale polymer composites: Processing, properties, and applications. **Composites Part B: Engineering, 138,** 122-139.

50. Elberry, A. M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A., Larmi, M., 2021. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. **International Journal of Hydrogen Energy, 46(29),** 15671-15690.

51. Ertekin, M., 2017. Aramid fibers, s. 153-167. In: Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites (Eds: Seydibeyoğlu, M. Ö., Mohanty, A. K., Misra, M.). Woodhead Publishing.

52. He, A., Xing, T., Liang, Z., Luo, Y., Zhang, Y., Wang, M., … Xu, W., 2024. Advanced aramid fibrous materials: fundamentals, advances, and beyond. **Advanced Fiber Materials, 6(1),** 3-35.

53. Gore, P. M., Kandasubramanian, B., 2018. Functionalized aramid fibers and composites for protective applications: a review. **Industrial Engineering Chemistry Research, 57(49),** 16537-16563.

54. Obande, W., Brádaigh, C. M. Ó., Ray, D., 2021. Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion–a review. **Composites Part B: Engineering, 215,** 108771.

55. Yahaya, R., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Leman, Z., Zainudin, E. S., 2014. Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(24),** 2242-2254.

56. Costa, A. P. D., Botelho, E. C., Costa, M. L., Narita, N. E., Tarpani, J. R., 2012. A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications. **Journal of Aerospace Technology and Management, 4(3),** 255-265.

57. Demirarslan, S., 2004. *Plastik malzemenin özellikleri ve inşaat sektöründeki kullanım yerleri,* s. 173-184. 2. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, İstanbul, Türkiye.

58. Vasić, V., Schiesser, S., 2010. Microfillers–advantageous potential for white goods industry, s. 566-574. In: Macromolecular Symposia, 296(1). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

59. Valente, M., Rossitti, I., Sambucci, M., 2023. Different production processes for thermoplastic composite materials: sustainability versus mechanical properties and processes parameter. **Polymers, 15(1),** 242.

60. Rosenow, M. W. K., Andres, T. E., 1993. Carbon fiber reinforced PPS thermoplastic materials implemented in a cost-sensitive commercial application. Advanced Materials: **Performance Through Technology Insertion, 38,** 2055-2066.

61. Van Rijswijk, K., Bersee, H. E. N., 2007. Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites–an overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(3),** 666-681.

62. Offringa, A. R., 1996. Thermoplastic composites—rapid processing applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27(4),** 329-336.

63. McMahon, P.E. Developments in Reinforced Plastics—4; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1984.

64. Nunes, J. P., Silva, J. F., Marques, A. T., Crainic, N., Cabral-Fonseca, S., 2003. Production of powder-coated towpregs and composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials, 16(3),** 231-248.

65. Iyer, S. R., Drzal, L. T., 1990. Manufacture of powder-impregnated thermoplastic composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials, 3(4),** 325-355.

66. Chen, Q., Boisse, P., Park, C. H., Saouab, A., Bréard, J., 2011. Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes. **Composite Structures, 93(7),** 1692-1703.

67. Wedgewood, A., Granowicz, P., Zhang, Z., 2014. Multi-scale modeling of an injection over-molded woven fabric composite beam. In: CAE Design and Failure Analysis of Automotive Composites, s. 19.

68. Czigány, T., Karger-Kocsis, J., 2002. Textile fabric-reinforced thermoplastic polyester composites: sections *4–5*, s. 1144-1171. *In:* Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites (Ed: Fakirov, S.). Wiley-VCH, Weinheim.

69. Throne, J., 2024. Thermoforming, s. 449-480. In: Applied Plastics Engineering Handbook (Ed: Kutz, M.). William Andrew Publishing.
70. Gay, D., 2022. Composite Materials: Design and Applications, 4. Baskı. CRC Press, Boca Raton.
71. Campbell, F. C., 2010. Structural Composite Materials. ASM International, Materials Park, OH.
72. Mallick, P. K., 2017. Processing of Polymer Matrix Composites. CRC Press, Boca Raton.
73. Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., Akhatov, I., 2021. Thermoplastic pultrusion: **A review. Polymers, 13(2),** 180.
74. Katayama, T., Hayakawa, Y., Hakotani, M., Shinohara, M., 1997. Application of roll forming to SMC forming. **Composite Structures, 38(1-4),** 517-524.
75. Chawla, K. K., 2012. Composite Materials, 3. Baskı. CRC Press, London
76. Biron, M., 2012. Thermoplastics and Thermoplastic Composites. William Andrew Publishing, Oxford, 1064 s.
77. Xian, G., Zhou, P., Bai, Y., Wang, J., Li, C., Dong, S., … Zhong, J., 2024. Design, preparation and mechanical properties of novel glass fiber reinforced polypropylene bending bars. **Construction and Building Materials, 429,** 136455.
78. Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., Naveen, J., 2014. Glass fiber-reinforced polymer composites–a review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33(13),** 1258-1275.
79. Okereke, M. I., 2016. Flexural response of polypropylene/E-glass fibre reinforced unidirectional composites. **Composites Part B: Engineering, 89**, 388-396.
80. Zhu, L. H., Sheng, J. F., Guo, Z. F., Ju, X. S., Li, S., Chen, Y. F., Luo, J. 2014. Properties of polypropylene and surface modified glass-fibre composites. **Polymers and Polymer Composites, 22**(4), 381-386.
81. Russo, P., Acierno, D., Simeoli, G., Iannace, S., Sorrentino, L. 2013. Flexural and impact response of woven glass fiber fabric/polypropylene composites. **Composites Part B: Engineering, 54**, 415-421.
82. Wang, Y., Pan, L., Li, Z., Yue, G., Man, J. 2023. Study on static and dynamic mechanical properties of glass fiber reinforced polypropylene laminated self-

reinforced polypropylene composite structure. **Composite Structures, 314**, 116978.

83. Çakır, M., Berberoğlu, B. 2018. E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. **El-Cezeri, 5**(3), 734-740.
84. Etcheverry, M., Barbosa, S. E. 2012. Glass fiber reinforced polypropylene mechanical properties enhancement by adhesion improvement. **Materials, 5**(6), 1084-1113.
85. Calhoun, A. (2016). Polypropylene. *In:* Multilayer flexible packaging (pp. 35-45). William Andrew Publishing, Amsterdam.
86. Busico, V., Cipullo, R., 2001. Microstructure of polypropylene. **Progress in Polymer Science, 26(3)**, 443-533.
87. Greene, J. P., 2021. Automotive Plastics and Composites: Materials and Processing. William Andrew Publishing, Amsterdam, 350 s.
88. Gohil, S., Suhail, S., Rose, J., Vella, T., Nair, L. 2017. Polymers and composites for orthopedic applications. *In:* Materials for Bone Disorders (pp. 349-403). Academic Press, Amsterdam, 500 s.
89. Dietz, W. 2016. Effect of cooling on crystallization and microstructure of polypropylene. **Polymer Engineering Science, 56**(11), 1291-1302.
90. Campo, E. A., 2008. Selection of Polymeric Materials: How to Select Design Properties from Different Standards. William Andrew Publishing, Norwich, NY, 350 s.
91. Niaounakis, M., 2019. Recycling of Flexible Plastic Packaging. William Andrew Publishing, Norwich, NY, 466 s.
92. Sin, L. T., Tueen, B. S., 2022. Plastics and Sustainability: Practical Approaches. Elsevier, 318 s.
93. Blees, M., Winkelman, G., Balkenende, A., Den Toonder, J. 2000. The effect of friction on scratch adhesion testing: application to a sol–gel coating on polypropylene. **Thin Solid Films, 359**(1), 1-13.
94. Sadiku, R., Ibrahim, D., Agboola, O., Owonubi, S. J., Fasiku, V. O., Kupolati, W. K., ... Ojijo, V., 2017. Automotive components composed of polyolefins, s. 449-496. In: Polyolefin Fibres: Industrial and Medical Applications (Ed: Ugbolue, S. C. O.). Woodhead Publishing, Cambridge, 428 s.

95. Verma, D., Kenari, M. A., Okhawilai, M., 2022. Matrix materials for coir fibers: mechanical and morphological properties, s. 107-133. *In:* Coir Fiber and Its Composites: Processing, Properties and Applications (Ed: Jawaid, M.). Woodhead Publishing, Cambridge, 450 s.

96. Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., Naveen, J. 2014. Glass fiber-reinforced polymer composites–a review. **Journal of reinforced plastics and composites, 33**(13), 1258-1275.

97. Megahed, A., Osama, M., Selmy, A., Abdelhaleem, A. M. 2022. Study of bearing strength for injection molded GFRPP composites under dry and wet conditions. **Scientific Reports, 12**(1), 17551.

98. Yudhanto, A., Lubineau, G., Wafai, H., Mulle, M., Pulungan, D., Yaldiz, R., Verghese, N. 2016. Monotonic and cyclic responses of impact polypropylene and continuous glass fiber-reinforced impact polypropylene composites at different strain rates. **Polymer Testing, 51**, 93-100.

99. Mazumdar, S., 2001. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press, Boca Raton, FL, 416 s.

100. Megahed, A., Osama, M., Selmy, A., Abdelhaleem, A. M. 2022. Study of bearing strength for injection molded GFRPP composites under dry and wet conditions. **Scientific Reports, 12(1)**, 17551.

101. Demetzos, C. 2008. Differential scanning calorimetry (DSC): a tool to study the thermal behavior of lipid bilayers and liposomal stability. **Journal of liposome research, 18(3)**, 159-173.

102. Richardson, M. J. 1997. Quantitative aspects of differential scanning calorimetry. **Thermochimica Acta, 300(1-2)**, 15-28.

103. Tanaka, S. 1992. Theory of power-compensated DSC. **Thermochimica acta, 210,** 67-76.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Abdullah SAAR
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
e-mail:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2025
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2020
Lise	Kocasinan Anadolu Lisesi, Kayseri	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2021-Halen	FERRE	AR-GE Uzmanı
2020-2021	SİMFER	Planlama Uzman Yardımcı

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Saar, A., Bezen, C., Caliskan, U., Apalak, Z. G., 2024. Effects of consolidation parameters on flexural behavior of polypropylene/glass fiber thermoplastic composites. **International Scientific and Vocational Studies Journal**, **8(2)**, 223-234.