

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



KARBON TİPİNİN PA6 KOMPOZİTLERİNİN
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUSUF CEMİL ÇELEBİ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK

BOLU, TEMMUZ 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Yusuf Cemil ÇELEBİ tarafından hazırlanan “**KARBON TİPİNİN PA6 KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği kabul edilmiştir. 23/07/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Ahmet KESKİN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğretim Üyesi Recep KOÇ
Balıkesir Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....
YUSUF CEMİL ÇELEBİ

ÖZET

KARBON TİPİNİN PA6 KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUSUF CEMİL ÇELEBİ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YAHYA ALTUNPAK)

BOLU, TEMMUZ - 2025

XIII+ 70 sayfa

Bu tez çalışması, karbon fiber takviyesinin PA6 matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri ve yoğunluğu üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde incelemiştir. Çalışmamız, numuneler üzerinde yapılan yoğunluk ve çekme dayanımı testleri ile karbon tipinin ve oranın etkisini incelemeyi, teorik olarak kullanılan hesaplama yöntemleri ile de elde ettiğimiz deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmayı amaçlamıştır. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen kompozitlerde, kütlece %10 ve %20 oranlarında, 0,08 mm ve 3 mm uzunluklarında karbon fiberler takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, artan fiber oranıyla birlikte kompozitlerin mekanik özelliklerinde ve yoğunluğunda belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, daha uzun fiberlerin kullanılması da mekanik özelliklerde ve yoğunlukta artışa neden olmuştur. Ancak, deneysel olarak elde edilen bu verilerin teorik modellerle karşılaştırılması, özellikle uzun fiberlerde anlamlı farklılıklar ortaya koymuştur. Bu farklılığın temel nedeni olarak, enjeksiyon kalıplama sürecinde fiberlerin yönlenmesinin tam olarak kontrol edilememesi sonucu ortaya çıkan süreksiz ve dağınık fiber dizilimi olduğu düşünülmektedir. Teorik olarak da incelemeler yapılmış ve modifiye karışım kuralına göre yapılan incelemelerde 0,08 mm fiberli yapının çekme dayanımı, deneyselle göre alt değerlerde kalmış; 3 mm fiberli yapılarda ise teorik sonuç daha üst değerlerde kalmıştır. Sonuç olarak, fiber uzunluğunun artmasıyla birlikte, bu düzensiz yapı teorik hesaplamalarla deneysel sonuçlar arasındaki uyumsuzluğu daha da artırmıştır. Artan oran ve fiber uzunluğunun; üretim yönteminin ve fiber tipinin kompozit mikroyapısı üzerindeki etkisi de göz önünde bulundurulduğunda, mekanik özellik ve yoğunluğunda artışlara neden olduğu, teorik incelemelerin minimum ve maksimum değerler arasında değişkenlikler verebildiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Karbon Fiber Tipi, PA6 Kompozitleri, Çekme Dayanımı, Mekanik Özellikler, Yoğunluk

ABSTRACT

EFFECT OF CARBON TYPE ON THE PROPERTIES OF PA6 COMPOSITES

MSC THESIS

YUSUF CEMIL CELEBI

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. YAHYA ALTUNPAK)

BOLU, JULY 2025

XIII+ 70 pages

This thesis systematically investigated the effects of carbon fiber reinforcement on the mechanical properties and density of PA6 matrix composites. Our study aimed to examine the influence of carbon fiber type and ratio through density and tensile strength tests on samples. Furthermore, we sought to compare our experimental results with theoretical calculations. In composites produced by injection molding, carbon fibers with lengths of 0.08 mm and 3 mm were used as reinforcement at 10 wt% and 20 wt% ratios. Experimental results demonstrated a significant increase in both the mechanical properties and density of the composites with increasing fiber ratio. Similarly, the use of longer fibers also led to improvements in mechanical properties and density. However, a comparison of these experimentally obtained data with theoretical models revealed significant discrepancies, particularly for longer fibers. The primary reason for this difference is thought to be the discontinuous and scattered fiber arrangement resulting from the inability to fully control fiber orientation during the injection molding process. Theoretical analyses, specifically those based on the modified rule of mixtures, showed that the tensile strength of the 0.08 mm fiber structure was lower than the experimental values, while for the 3 mm fiber structures, the theoretical results were higher. Consequently, as fiber length increased, this irregular structure further amplified the inconsistency between theoretical calculations and experimental results. In conclusion, considering the effect of the production method and fiber type on the composite microstructure, increasing fiber ratio and fiber length resulted in improved mechanical properties and density. It was also observed that theoretical analyses could yield variations between minimum and maximum values.

KEYWORDS: Carbon Fiber Type, PA6 Composites, Tensile Strength, Mechanical Properties, Density

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
GRAFİK LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Araştırmanın Önemi	2
1.2 Araştırmanın Amacı.....	3
1.3 Kapsam ve Yöntemler	4
1.4 Kompozit Malzemeler	4
1.4.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	6
1.4.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
1.4.2.1 Matris Türüne Göre Kompozitler.....	7
1.4.2.2 Takviye Türüne Göre Kompozitler.....	8
1.4.3 Kompozit Üretim Yöntemleri.....	10
1.4.3.1 Islak (Wet) Lay-Up / Hand Lay-Up Prosesi	10
1.4.3.2 Sprey Lay-Up (Püskürtmeyle Yığma) Prosesi	10
1.4.3.3 Otomatik Teyp Lay-Up (ATL) Prosesi	11
1.4.3.4 Filament Sarma Prosesi.....	11
1.4.3.5 Pultrüzyon Prosesi.....	12
1.4.3.6 Reçine Transfer Kalıplama Prosesi.....	13
1.4.3.7 Enjeksiyon Kalıplama	13
1.5 Poliamid 6 (PA6) ve Kompozit Malzemeler	14
1.5.1 Poliamid 6 (PA6).....	15
1.5.2 PA6'nın Kimyasal Yapısı ve Sentezi	16
1.5.3 PA6'nın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	17
1.5.4 PA6'nın Avantajları ve Dezavantajları	19
1.6 Karbon Fiber ve Karbon Fiber Takviyeli Malzemeler	19
1.6.1 Karbon Fiber.....	20
1.6.2 Karbon Fiberin Hammaddeleri.....	21
1.6.3 Karbon Fiberin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri.....	22
1.6.4 Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Özellikleri	24
1.6.5 Mekanik ve Termal Özellikler.....	25

1.6.6 Korozyon Direnci, Hafiflik Avantajı ve Çevresel Dayanıklılık	26
1.6.7 Kullanım Alanları ve Endüstriyel Uygulamaları	27
1.6.8 Havacılık, Otomotiv ve Savunma Sanayisindeki Kullanımı	28
1.6.9 Medikal, Spor Ekipmanları ve Diğer Mühendislik Uygulamaları	29
1.7 Literatür Taraması	31
2. MATERYAL ve YÖNTEM	33
2.1 Hammadde Özellikleri	34
2.1.1 PA6 Granül Özellikleri	34
2.1.2 Karbon Fiber Özellikleri	35
2.2 İmalat Yöntemi	37
2.3 Numunelerin Hazırlanması	38
2.4 Karbon Fiber Takviyeli PA6 Kompozitlerinin Üretim Süreci	38
2.5 Numune Şekillendirme ve Standartlara Uygunluk	39
2.6 Deneysel Yöntemler	41
2.6.1 Çekme Testi Yöntemi	41
2.6.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	42
2.6.3 Yoğunluk Ölçümü	43
2.7 Teorik bilgiler	43
2.7.1 Teorik Yoğunluk Hesaplama	43
2.7.2 Kompozit Malzeme Mekanikliği	44
2.7.2.1 Teorik Hacim	44
2.7.2.2 Teorik Yoğunluk	45
2.7.2.3 Teorik Çekme Dayanımı	45
3. BULGULAR	50
3.1 Yoğunluk Analizi Sonuçları	50
3.1.1 Kütle Değerleri	50
3.1.2 Kütle ve Hacim oranları	50
3.1.3 Teorik ve Deneysel Yoğunluk	51
3.2 SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Görüntüleri	51
3.3 Çekme Deneyi Sonuçları	52
3.3.1 Çekme Dayanımı Teorik Hesaplama	54
3.4 Verilerin Değerlendirilmesi	56
3.4.1 Yoğunluk Sonuçları	56
3.4.2 Çekme Testi Sonuçları	58
3.4.3 Teorik ve Deneysel Çekme Dayanımı Sonuçları	59
4. TARTIŞMA	62
4.1 PA6 Matrisli Karbon Fiber Takviyesinin Yoğunluğa Etkisi	62
4.2 Karbon Oranı ve Tipinin Çekme Dayanımı Sonuçlarına Etkisi	62
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	65
5.1 Sonuçlar	65
5.2 Öneriler	66
KAYNAKLAR	68

GRAFİK LİSTESİ

Sayfa

Grafik 3.1. Çekme dayanımı test sonuçları.....	52
Grafik 3.2. Deneysel toplam yüzde uzama sonuçları.....	54
Grafik 3.3. Deneysel ve teorik yoğunluk sonuçlarının karşılaştırılması.....	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Kompozitlerin sınıflandırılması.....	6
Şekil 1.2. Takviye elemanına göre sınıflandırılması	9
Şekil 1.3. Fiber takviye şekilleri	9
Şekil 1.4. Handy-lay up prosesi	10
Şekil 1.5. Sprey-lay up prosesi	11
Şekil 1.6. Otomatik teyp lay-up yerleştirme tekniği	11
Şekil 1.7. Filament sarma prosesi	12
Şekil 1.8. Pultrüzyon prosesi	12
Şekil 1.9. Reçine transfer kalıplama	13
Şekil 1.10. Enjeksiyon kalıplama prosesi	14
Şekil 2.1. ISO 527-4 çekme testi numunesi ölçüleri.....	40
Şekil 2.2. Test numunesi tasarım	44
Şekil 2.3. Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi	46

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Farklı kompozit malzeme türlerinin özellikleri.....	7
Tablo 1.2. PA6'nın fiziksel ve mekanik özellikleri	18
Tablo 1.3. Karbon fiber hammadde özellikleri	22
Tablo 1.4. Farklı tip karbon fiberler ve özellikleri	23
Tablo 1.5. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin çekme dayanımı	26
Tablo 1.6. PA6/Karbon fiber kompozitlerin çekme dayanımı sonuçları.....	27
Tablo 1.7. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin sektörel kullanımı.....	29
Tablo 1.8. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin uygulama alanları.....	31
Tablo 1.9. Çekme dayanımı test sonuçları	31
Tablo 1.10. Karbon fiber takviyesin yoğunluğa etkisi	32
Tablo 1.11. Karbon fiber takviyesinin çekme dayanımına etkisi.....	32
Tablo 2.1. Testlerde kullanılan PA6 özellikleri	34
Tablo 2.2. Testlerde kullanılan karbon fiber özellikleri	35
Tablo 2.3. Ekin 160 Orion enjeksiyon makinesi özellikleri.....	37
Tablo 3.1. Kütlece karbon miktarları	50
Tablo 3.2. Kütle ve hacim oranları	50
Tablo 3.3. Deneysel yoğunluk ölçüm sonuçları	51
Tablo 3.4. Teorik yoğunluk hesap sonuçları	51
Tablo 3.5. Teorik kritik fiber uzunlukları hesaplama sonuçları	54
Tablo 3.6. Teorik çekme dayanımı hesaplama sonuçları	55
Tablo 3.7. Teorik çekme dayanımı yüzde artışlar	55
Tablo 3.8. Teorik ve deneysel yoğunluk sonuçlarını yüzde artışları.....	58
Tablo 3.9. Çekme testi sonuçları	58
Tablo 3.10. Teorik ve deneysel çekme dayanımı sonuçları	60
Tablo 4.1. Karbon fiber oranının yoğunluğa etkisi	62
Tablo 4.2. Karbon fiber oranının çekme dayanımına etkisi	63
Tablo 4.3. Karbon fiber oranının çekme dayanımına etkisi	63

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 2.1. PA6 granülleri	35
Fotoğraf 2.2. Karbon fiber 3 mm	36
Fotoğraf 2.3. Karbon fiber 0,08 mm	36
Fotoğraf 2.4. Kullanılan Ekin 160 Orion enjeksiyon makinesi	37
Fotoğraf 2.5. İmalatı gerçekleştirilen test numuneleri	39
Fotoğraf 2.6. ISO 527-4'e uygun olarak üretilmiş enjeksiyon kalıbı	41
Fotoğraf 2.7. Çekme testi cihazı	42
Fotoğraf 2.8. SEM cihazı	43
Fotoğraf 3.1. Kopma yüzeyi SEM görüntüleri	52



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AFP	: Otomatik fiber yerleştirme
CTP	: Cam fiber takviyeli polyester
d_f	: Fiber çapı
DSC	: diferansiyel taramalı kalorimetri
FDM	: Fused Deposition Modeling
GF	: Cam fiber
GO	: Grafen oksit
ISO	: Uluslararası Standartlar Örgütü
l_f	: Fiber uzunluğu
l_k	: Kritik fiber boyu uzunluğu
MPa	: Mega Pascal
PA6	: Poliamid 6
PAN	: Poliakrilonitril
PETG	: Polietilen tereftalat glikol
RTM	: Reçine transfer kalıplama
T_g	: Cam geçiş sıcaklığı
V_c	: Kompozit hacim oranı
v_c	: Kompozit hacmi
V_f	: Fiber hacim oranı
v_f	: Fiber hacmi
V_m	: Matris hacim oranı
v_m	: Matris Hacmi
ρ_c	: Kompozit yoğunluğu
ρ_f	: Fiber yoğunluğu
ρ_m	: Matris yoğunluğu
σ_c	: Kompozit çekme dayanımı
σ_f	: Fiber çekme dayanımı
σ_m	: Matris çekme dayanımı

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezim sürecinde bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. Yahya ALTUNPAK'a, yüksek lisans eğitimime başlamama öncülük eden Doç. Dr. Nihat DALDAL'a, tezimin imalat aşamalarında bilgi ve desteğini esirgemeyen değerli mesai arkadaşım Gökhan MERAL'e teşekkür ederim.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve sabrıyla bana güç veren kıymetli eşim Merve ÇELEBİ'ye içtenlikle teşekkür eve karbon tipiniderim.



1. GİRİŞ

Poliamid 6 (PA6) termoplastiği mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır; ancak bu malzemenin çekme dayanımı ve yoğunluğu bazı durumlarda arzu edilen düzeylerde olmayabilir. Bu durum, özellikle belirli uygulamalarda performans sınırlamalarına yol açabilmekte ve PA6'nın mekanik özelliklerinde yetersizliklere neden olabilmektedir. Bu bağlamda, yüksek çekme mukavemeti ve düşük yoğunluğu ile öne çıkan grafen, karbon fiber ve cam fiber gibi takviyeler, PA6 kompozitlerine eklendiğinde malzemenin dayanımını ve genel performansını önemli ölçüde artırabilmektedir. Otomotiv, havacılık ve spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde bu tür kompozit malzemelere yönelik ilgi giderek artmaktadır (Ichakpa vd., 2023). Bu çalışma, karbon fiber takviyesinin PA6 kompozitlerinin çekme dayanımı ve yoğunluk gibi temel özelliklerini nasıl etkilediğini incelemeyi amaç edinmiştir.

Malzeme bilimi alanında fiberler, geleneksel malzemelere kıyasla sundukları yenilikçi çözümlerle dikkat çekmektedir. Fiber ve benzeri takviyelerin matris malzemelere entegrasyonu, bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Çalışmalardaki bulgular, bu takviyelerin PA6 kompozitlerinin mukavemet ve dayanıklılığını genel olarak olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Örneğin, bazı PA6 karbon fiber kompozitlerinde karbon fiber oranı ve tiplerinin yapıya etkisi araştırılmış ve artan fiber oranları ve değişen tiplerin mekanik özelliklerde iyileşme sağladığı rapor edilmiştir (Dong vd., 2025). Bu çalışma, farklı karbon fiber oranlarının ve tiplerinin PA6 kompozitlerinin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı hedef edinmiştir.

Bu araştırmanın temel amacı, PA6 kompozitlerine karbon fiber ilavesinin ve fiber tipinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, çeşitli test yöntemleri ve deneysel yaklaşımlar kullanılarak malzemenin fiziksel parametreleri ve dayanım özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. PA6 kompozitlerinin farklı çalışma koşullarındaki performansına yönelik mevcut bilgiler dikkate alındığında, bu çalışmadan elde edilen verilerin mühendislerin malzeme seçimi süreçlerinde kritik bir rol oynaması beklenmektedir. Ayrıca, bu araştırma yalnızca PA6 kompozitlerinin endüstriyel uygulamalara entegrasyonunu desteklemekle

kalmayıp, karbon fiber takviyeli malzemelerin gelecekteki geliştirme çalışmalarına da katkı sağlamayı amaç edinmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmanın hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalarda değerli bir kaynak teşkil etmesi hedeflenmiştir.

1.1 Araştırmanın Önemi

Karbon fiber takviyeli malzemelerin, poliamid 6 (PA6) gibi polimer matrislere entegrasyonu, mühendislik alanında yeni olanaklar sunmaktadır. Yüksek çekme mukavemeti ve düşük yoğunluk kombinasyonu sayesinde, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde hafif ve dayanıklı yapıların geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Palola vd., 2022). Sürekli fiber kullanımına yönelik araştırmalar, geleneksel otomatik yerleştirme yöntemlerine kıyasla üretim süreçlerinde verimliliği ve kaliteyi artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu gelişmeler, mühendis ve araştırmacıların karbon fiber takviyeli kompozitler üzerindeki çalışmalarını derinleştirirken, sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına olan bağlılıklarını da pekiştirmektedir.

Günümüzde, endüstrilerin sürekli değişen gereksinimlerine yanıt vermek amacıyla çeşitli mühendislik yaklaşımlarıyla kompozit malzemelerin geliştirilmesine yönelik yeni yöntemler uygulanmaktadır. Karbon fiber matların üretiminde keşfedilen inovatif karıştırma teknikleri, fiber uzunluğu ve homojenlik kontrolünü iyileştirerek mekanik özelliklerde önemli ilerlemeler sağlamaktadır (Ghossein, 2019). Laboratuvar ölçekli deneylerde %60'a varan işleme süresi azalmaları gibi önemli kazanımlar elde edilmesi, PA6 ile takviye edilmiş karbon fiber kompozitlerin endüstriyel uygulama potansiyelini artırdığı yönündeki gözlemleri desteklemektedir.

Üretim ve uygulama alanındaki bu değişimler, mühendisleri ve araştırmacıları kompozit malzemelerin yerel ve küresel ölçekte daha geniş bir kullanım alanına yayılması yönünde teşvik etmektedir. Kongre ve sempozyum gibi bilimsel etkinlikler, bu alandaki bilgi paylaşımını ve disiplinler arası iş birliklerini destekleyen önemli platformlar olarak işlev görmektedir. Ek olarak, kompozit malzemelerin geliştirilmesinde çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği gibi faktörlerin dikkate alınması, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin önemini yalnızca mühendislik süreçleriyle sınırlı kalmayıp, geniş bir uygulama yelpazesi ve çevreci teknolojik çözümlerle de ortaya koymaktadır.

1.2 Araştırmanın Amacı

Poliamid 6 (PA6) kompozitlerinde karbon fiber kullanımı, malzemenin çekme dayanımında artış ve yoğunluğunda belirgin olumlu etkilerle ilişkilendirilmektedir. Karbon fiberlerin düşük yoğunluklu olmalarına rağmen yüksek çekme mukavemetine sahip olmaları, mühendislik alanında giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu çalışmada, farklı oranlarda ve tiplerde karbon fiber takviyesinin PA6 kompozitlerinin özelliklerinde meydana getirdiği değişimler ve bu değişimlerin potansiyel pratik avantajları incelenmiştir. Sistematiik bir yaklaşımla yürütölen farklı karbon fiber oranlarına sahip testlerden elde edilen veriler, grafik ve tablolar aracılığıyla sunulurak araştırmayı somutlaştırma hedeflenmiştir.

Çalışmanın asıl odak noktası, farklı karbon fiber türlerinin ve işleme yöntemlerinin PA6 kompozitlerinin performansı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasıdır. Örneğın, üretim yöntemi, fiber dağılımı, nem alma ve kompozit malzemenin işleme sıcaklıkları gibi faktörlerin, takviyeli PA6'nın mekanik özelliklerine katkı sağlayabileceğı düşünölmüştür. Bu yaklaşım, karbon fiberlerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü yoluyla sağladığı çevresel avantajlarla da ilişkilidir. Doğal kaynakların korunması ve geri dönüşümüne yönelik mevcut çalışmalar göz önüne alındığında, çevresel etkiler ve ekonomik sürdürülebilirlik de bu araştırmanın önemli unsurları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma numuneler üzerinde yapılan yoğunluk ve çekme dayanımı testleri ile karbon tipinin ve oranının etkisini incelemeyi, teorik olarak kullanılan hesaplama yöntemleri ile de elde ettiğımız deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmayı amaçlamıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların, sektördeki uygulamalara yönelik somut öneriler sunması ve malzeme tasarımında yeni stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir. Ayrıca, toplanan veriler ve bulgular, görsel materyallerle desteklenerek çalışmanın sunumunun ve anlaşılabilirliğinin artırılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, karbon fiber takviyesine yönelik bu araştırmaların, kompozit malzeme biliminin ilerlemesine katkıda bulunarak daha güçlü, hafif ve sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlayacağı öngörölmüştür.

1.3 Kapsam ve Yöntemler

Kompozit malzemelere olan ilginin artmasıyla birlikte, özellikle karbon fiber takviyesi gibi yenilikçi yöntemlerle malzeme mekanik performansının iyileştirilmesine yönelik araştırmalar ivme kazanmıştır. Bu çalışma, farklı karbon fiber yüzdeleriyle ve farklı tiplerde hazırlanan poliamid 6 (PA6) kompozitlerinin çekme dayanımı ve yoğunluk gibi özelliklerine karbon fiber oranının etkilerini çeşitli açılardan incelemiştir. Çalışmanın metodolojisi, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile belirli oranlarda ve farklı tiplerde karbon fiberlerin PA6 ile karıştırılmasını, hazırlanan numunelerin fiziksel özelliklerinin deneysel olarak test edilmesini ve elde edilen verilerin analiz edilmesini içermektedir. Kullanılacak deneysel testler aracılığıyla kompozitlerin dayanımını etkileyen parametrelerin sistematik olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Deneysel süreçte, karbon fiber oranındaki artışın PA6 kompozitlerinin mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimler detaylı bir şekilde kaydedilmiştir. Çekme testleri, ISO standartlarına uygun olarak tasarlanmış numunelerle yapılmış ve her bir numuneye uygulanan yüklerin etkileri dikkate alınmıştır. Çekme dayanımı ve yoğunluk değerleri titizlikle ölçülerek, olası küçük sapmalar dahi not edilmiştir. Deneysel bulgulara ek olarak, teorik çerçeve ve önceki çalışmalardan elde edilen verilerle desteklenerek analiz sürecinin kapsamı artırılmaya çalışılmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen verilerin analizi sayesinde, karbon fiber takviyesinin PA6 kompozitlerinin mekanik performansına olan katkıları net bir şekilde ortaya konulmuştur. Bu iyileşmelerin yalnızca çekme dayanımında değil, aynı zamanda malzemenin yoğunluk özelliklerinde de gözlemlenmesi, endüstriyel uygulamalarda maliyet etkinliği ve teknik performans arasında önemli bir denge sağlayabilir (García-Collado vd., 2022). Özellikle otomotiv ve havacılık gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde, bu takviye yönteminin yaygın etkiler yaratması ve modern mühendislik uygulamalarına adaptasyon açısından araştırmanın değerini artırması öngörülmüştür.

1.4 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin bir araya gelmesiyle oluşan ve özgün özellikler sergileyen yapılardır; günlük yaşamda ve özellikle makine mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu malzemelerin temelini genellikle

"matris" olarak adlandırılan bir yapı oluşturur. Bu matris içinde karbon fiber gibi farklı fiberler veya çeşitli dolgu maddeleri bulunur. Örneğin, karbon fiber yüksek çekme dayanımı ve düşük yoğunluğu nedeniyle kompozit üretiminde öne çıkmaktadır; PA6 gibi termoplastik bir matrisle birleştiğinde, geleneksel malzemelerden daha üstün performans gösterebilmektedir. Dayanıklılık ve hafifliğin kombinasyonu, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde tercih edilmelerini sağlamakta ve böylece kompozitler mekanik performansla ilgili önemli veriler sunmaktadır.

PA6 içerisine eklenen karbon fiberle güçlendirilmiş kompozitler, mühendislik malzeme geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Araştırmalar genel olarak göstermektedir ki, karbon fiberin oransal artışı, kompozitlerin çekme mukavemeti ve yoğunluğu üzerinde önemli iyileşmelere yol açabilmektedir. Örneğin, karbon fiberlerin PA6 matrisine ilavesi çekme dayanımını belirgin bir şekilde artırarak uygulama olanaklarını genişletmekte ve farklı mühendislik alanlarına giriş imkânı sunmaktadır. Bu çalışmada sunulan bulgular, malzemenin direnç ve kararlılığını artırarak, bu tür kompozitlerin çeşitli mühendislik projelerinde daha sık tercih edilmesine neden olduğunu ortaya koymaktadır (Abdullah vd., 2024). Genel olarak bu durum, kompozitlerin eğilimlerini ve mühendislikteki yerini anlamamıza yardımcı olmaktadır.

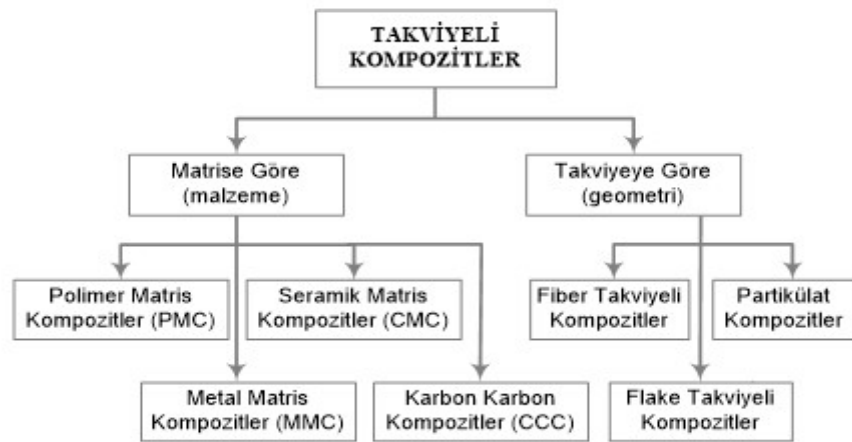
Araştırmaların odak noktası çoğunlukla kompozitlerin fiziksel ve mekanik niteliklerinin değerlendirilmesi olmakta ve bu çerçevede karbon fiberlerin etkilediği performans değişiklikleri ön plana çıkmaktadır. Dayanıklılık ve elastikiyet modülü gibi parametreler üzerinden detaylı analizler yapılmaktadır; üstelik üretim süreçlerinin maliyet etkinliği ve verimliliği de bu malzemelerin pratikte ne kadar uygulanabilir olduğunu doğrudan etkilemektedir (Taylor vd., 2021). Bu çalışmalara dayalı sonuçlar, özellikle karbon nanotüp ve diğer nanoteknolojik bileşenlerin eklenmesiyle kompozitlerin özelliklerinde nasıl değişiklikler meydana geldiğini gözler önüne sermektedir. Bu sonuçlar, yeni mühendislik tasarımları ve malzeme seçim süreçleri için sağlam ve kapsamlı bir temel sunarken, gelecekteki araştırmalara da yol gösterici niteliktedir. Ayrıca, bu süreçlerde kullanılan modern filamentlerin örnekleri de bize temel bir referans oluşturmaktadır.

1.4.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip en az iki bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, tek başına hiçbir bileşenin sağlayamayacağı üstün özellikler sergileyen malzeme türleridir. Bu malzemeler genellikle bir matris (bağlayıcı faz) ve bir takviye (fiber, partikül, kumaş vb.) içerecek şekilde yapılandırılır. Matris fazı; polimer, metal veya seramik esaslı olabilir ve takviye fazını bir arada tutarak yük aktarımı sağlar. Takviye fazı ise genellikle cam, karbon ya da aramid gibi fiberlerden oluşur ve kompozit malzemeye yüksek mukavemet, rijitlik ve fonksiyonel dayanıklılık kazandırır. Bu yapı sayesinde kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım, hafiflik, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi birçok avantaja sahiptir. Cam fiber takviyeli polyester (CTP), karbon fiber takviyeli epoksi ve beton gibi yapılar kompozit malzeme örnekleri arasında sayılabilir. Kompozitlerin bu özellikleri, başta havacılık, otomotiv ve inşaat olmak üzere birçok sektörde tercih edilmelerini sağlamaktadır.

1.4.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, üretildikleri matrisin yapısına ve içerdikleri takviye bileşenlerinin biçimine göre farklı alt gruplarda incelenir. Şekil 1.1.'de kompozitlerin sınıflandırılması gösterilmiştir (Beşergil,2025). Bu sınıflandırma, malzemenin performansını ve kullanım alanını doğrudan etkileyen önemli bir kriterdir.



Şekil 1.1. Kompozitlerin sınıflandırılması

1.4.2.1 Matris Türüne Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler kullanım alanlarına farklı matris elemanları ile elde edilebilir. Elde edilecek özellikler göz önünde bulundurularak bu yapılar ihtiyaca göre şekillenebilir. Tablo 1.1. farklı kompozit malzeme türlerinin özelliklerini göstermektedir.

Tablo 1.1. Farklı kompozit malzeme türlerinin özellikleri

Kompozit Türü	Yoğunluk Aralığı (g/cm ³)	Çekme Modülü Aralığı (GPa)	Çekme Dayanımı Aralığı (Mpa)	Kullanım Alanları
Polimer Matrisli	1.2- 1.8	20- 220	100- 3500	Havacılık, otomotiv, spor ekipmanları
Seramik Matrisli	2.0- 3.9	150- 480	200- 1000	Yüksek sıcaklık uygulamaları, kesici takımlar
Metal Matrisli	1.9- 6.0	70- 400	200- 1800	Otomotiv, havacılık, elektronik

Polimer matrisli kompozitler, düşük yoğunlukları, kolay şekillendirilebilme özellikleri ve yüksek dayanımları sayesinde birçok alanda kullanım potansiyeline sahiptir. Genellikle yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğun arzu edildiği uygulamalarda tercih edilmektedirler. Örneğin, karbon fiberle takviye edilmiş poliamid 6 (PA6) kompozitlerinde, yüksek gerilme direnci ve düşük yoğunluğun birleşimi malzemenin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Araştırmalar, karbon fiberin PA6'nın mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermekte ve bu takviye yöntemi kullanımının yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır (Ahmadian vd., 2019).

Metal matrisli kompozitler ise, metal ana yapı ve takviye malzemelerinin sinerjik etkileşimiyle yüksek mekanik dayanım ve özgül mukavemet sunmaktadır. Otomotivden savunma sanayisine kadar birçok sektörde bu malzemenin avantajları kendini göstermektedir. Metal matrisler, yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüklerini koruyabilen ve iyi ısı iletim özellikleriyle desteklendiklerinde üstün mekanik performans sergilemektedir. Örneğin, karbon fiberle güçlendirilmiş metal matrisli kompozitler hem düşük yoğunluk hem de

yüksek mukavemet açısından dikkat çekmektedir. Bu özellikler, özellikle performansın kritik olduğu uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

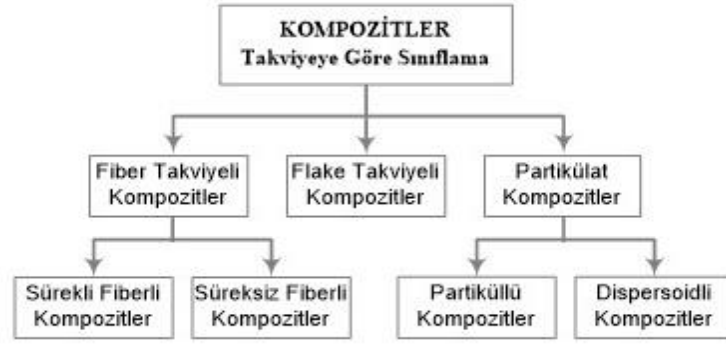
Seramik matrisli kompozitler ise, yüksek sıcaklık dayanımları ve aşınma dirençleriyle öne çıkmaktadır. Uzay, otomotiv ve enerji sektörleri gibi performansın kritik olduğu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Deneysel çalışmalar, seramik ve fiberlerin birlikte kullanımının mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Karbon fiberin seramik matrisle birleşimi, çekme dayanımını artırırken aşınma direncinde de belirgin yükselişlere neden olmaktadır. Özetle, bu kombinasyon seramik kompozitlerde kırılma tokluğunu da önemli ölçüde artırmaktadır (Mohammadkhani vd., 2023). Bu nedenle, seramik esaslı kompozitler mühendislik dünyasında inovasyon ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Karbon karbon kompozitler hem takviye malzemesi hem de matris malzemesi karbondur. Genellikle karbon fiberler bir karbon matris içinde gömülüdür. Bu karbon matris, farklı yöntemlerle (örneğin, piroliz yoluyla karbonca zengin öncüllerden elde edilerek veya kimyasal buhar biriktirme ile) oluşturulur.

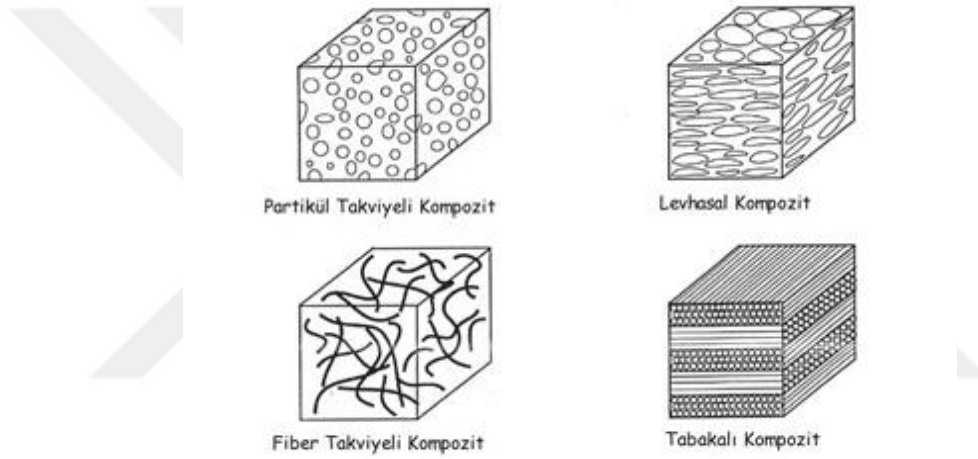
1.4.2.2 Takviye Türüne Göre Kompozitler

Kompozitler matris elemanı olarak sınıflandırıldığı gibi takviye elemanlarına göre de sınıflandırılabilir. Şekil 1.2. takviye elemanına göre sınıflandırmayı göstermektedir (Beşergil,2025). Şekil 1.3. fiber takviye şekillerine göre sınıflandırmayı, takviye elemanının yapı, şekil, yerleşme ve dizilişine göre yapıldığını göstermektedir (Altınsoy, 2009).

Sonuç olarak, polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler, her biri kendine özgü özellikler sunarak mühendislik uygulamalarında malzeme biliminin sınırlarını genişletmekte ve gelecekteki tasarımların temelini oluşturmaktadır.



Şekil 1.2. Takviye elemanına göre sınıflandırılması



Şekil 1.3. Fiber takviye şekilleri

Fiber takviyeli kompozitler; sürekli ya da kısa fiberlerin belirli yönlerde yerleştirilmesiyle üretilen bu kompozitler, yüksek mekanik dayanım ve rijitlik sağlar. Fiberlerin yönelimi, kompozit yapının izotropik veya anizotropik özellik göstermesine neden olur.

Partikül takviyeli kompozitler; küçük boyutlu sert parçacıkların matris içinde homojen şekilde dağıtılmasıyla elde edilen bu kompozitler, genellikle seramik veya metal parçacıklar içerir ve aşınma direnci ile sertlik gibi özellikleri artırmak amacıyla kullanılır.

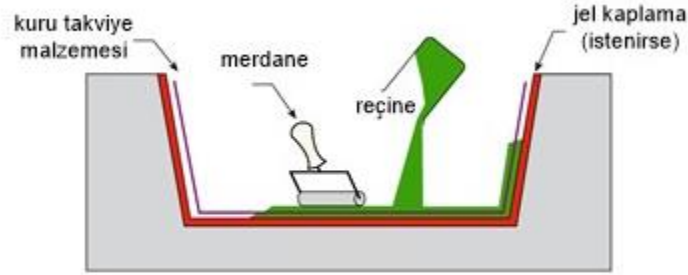
Yapısal kompozitler; katmanlı (lamine) yapılar veya sandviç yapılar gibi özel düzenlemelerle elde edilen bu tür kompozitler, büyük yüzeyli ve taşıyıcı özellikteki yapı elemanlarında tercih edilir.

1.4.3 Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin geniş yelpazesi, farklı matris ve takviye elemanlarının kombinasyonlarına olanak tanıyarak, bu malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemlerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Kullanılacak matrisin (örneğin polimer, metal, seramik) ve takviye elemanının (örneğin fiber, partikül, lamel) türü, nihai kompozitin istenen özelliklerini doğrudan etkilediği gibi, uygulanabilir üretim yöntemlerini de belirleyici bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma polimer matrisli kompozit malzemeler (PMC'ler) üzerine odaklanacağından, ağırlıklı olarak bu malzeme sınıfına özgü üretim yöntemleri detaylandırılacaktır. Zira polimerlerin işlenebilirlik özellikleri ve takviye elemanlarıyla etkileşimleri, PMC'lerin üretiminde kendine has tekniklerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

1.4.3.1 Islak (Wet) Lay-Up / Hand Lay-Up Prosesi

Elle yatırma (hand lay-up), fiber-reçine kompozitlerinin üretiminde kullanılan köklü ve temel bir tekniktir. Bu yöntemde reçine ve fiber takviye malzemeleri (veya kesilmiş önpregler) kalıp içerisine elle yerleştirilir ve ortamda sıkışan hava giderilir. Şekil 1.4. örnek bir handy-lay up prosesini göstermektedir. Genellikle sertleşme işlemi ortam sıcaklığında gerçekleşmekle birlikte, ısı uygulanarak bu süreç hızlandırılabilir (Beşergil,2025).

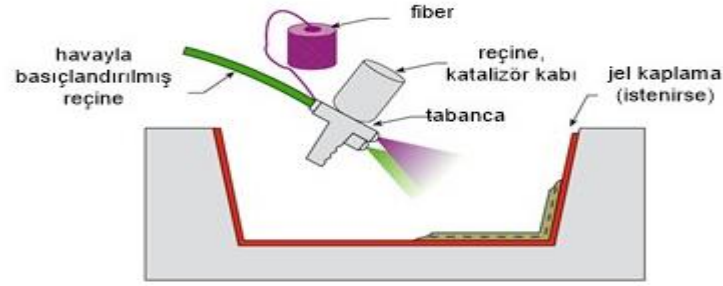


Şekil 1.4. Handy-lay up prosesi

1.4.3.2 Sprey Lay-Up (Püskürtmeyle Yığma) Prosesi

Püskürtme ile yatırma (sprey lay-up), açık kalıp tekniklerinden biridir (Şekil 1.5). Bu yöntemde, fiberler bir el tabancası vasıtasıyla kesilerek kalıp

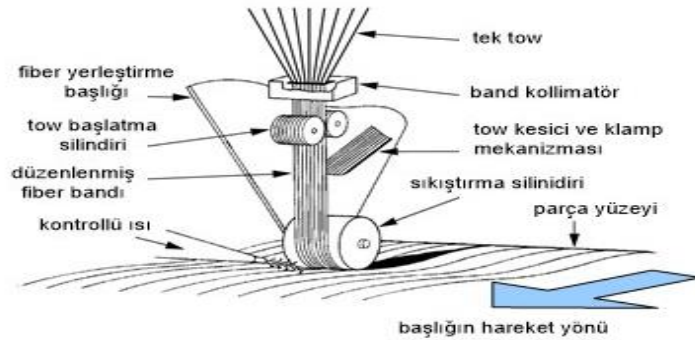
üzerindeki katalizlenmiş reçineye püskürtülür. Meydana gelen kompozit yapı, standart atmosferik şartlarda sertleşmeye bırakılır (Beşergil,2025) .



Şekil 1.5. Sprey-lay up prosesi

1.4.3.3 Otomatik Teyp Lay-Up (ATL) Prosesi

Otomatik fiber yerleştirme (AFP), kompozit malzeme bileşenlerinin bir yüzeye manuel olarak değil, bir makine aracılığıyla hassas bir şekilde konumlandırıldığı bir üretim sürecidir (Şekil 1.6.). Günümüzde bu amaçla kullanılan farklı otomatik fiber yerleştirme teknikleri bulunmaktadır (Beşergil,2025) .

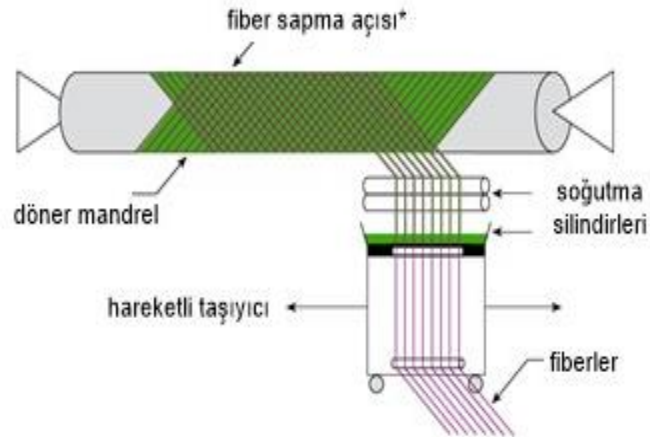


Şekil 1.6. Otomatik teyp lay-up yerleştirme tekniği

1.4.3.4 Filament Sarma Prosesi

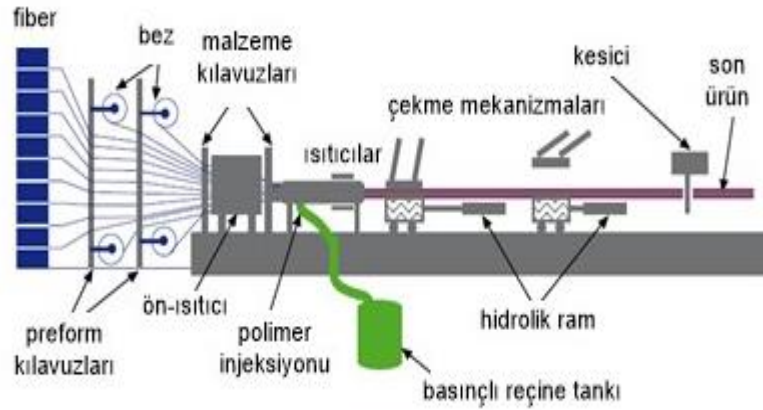
Filament sarma işleminde, reçine ile ıslatılmış filamentler, istenilen mekanik özelliklere ulaşmak için farklı açılarda dönen silindirik bir mandrel üzerine sarılır (Şekil 1.7.). Bu şekilde oluşturulan yapı, sertleştirildikten sonra mandrelinden ayrılır. Kullanılan filamentler (veya teypler, towlar, bantlar),

önceden polimerle kaplanabileceği gibi, bir polimer banyosundan geçirilerek termoset reçine ile doyurulabilir (impregnasyon). Bu doyurulmuş malzeme, sürekli olarak bir mandrel üzerine sarılır. Sarma süreci genellikle otomatiktir. Gerekli sarım kalınlığına ulaşıldığında ise, malzeme bir fırında veya oda sıcaklığında kürlenir (Beşergil,2025).



Şekil 1.7. Filament sarma prosesi

1.4.3.5 Pultrüzyon Prosesi



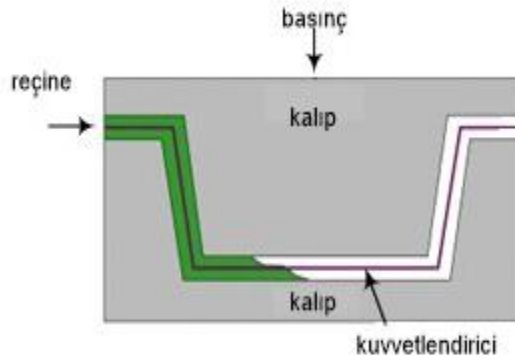
Şekil 1.8. Pultrüzyon prosesi

Pultrüzyon sürecinde, kesintisiz fiberler bir reçine tankına daldırılarak reçine ile tamamen doyurulmaları (impregnasyon) sağlanır. Reçine emdirilmiş fiberler, çelik bir ön şekillendirme kalıbından geçirilerek istenen profile getirilir

ve ardından krleme kalıbına iletilir (Şekil 1.8.). Bu kalıbın sıcaklığı, kullanılan reçine sisteminin sertleşmesini sağlayacak şekilde ayarlanır. Üretim hızı yaklaşık olarak 1 metre/dakika civarındadır. Bu yöntemle üretilen parçalar, sürekli fiberlerle güçlendirilmiş olup, ekstrüzyonda olduğu gibi, kesitleri kalıp boşluğu tarafından belirlenir ve sabittir. Krleşen rnler, sonrasında istenilen uzunluklarda kesilir (Beşergil,2025).

1.4.3.6 Reçine Transfer Kalıplama Prosesi

Reçine transfer kalıplama (RTM), kapalı kalıp teknikleri arasında yer alır. Bu yöntemde, takviye malzemesi doğrudan kalıba yerleştirilir veya bazı durumlarda önceden şekillendirilmiş bir halde (preform) kullanılır. Ardından, st kalıp alt kalıbın üzerine kapatılarak aradaki boşluğa reçine enjekte edilir (Şekil 1.9.). Krleşme işlemi, genellikle kalıbın ısıtılmasıyla sağlanır. Tüm bu adımlar, ortam sıcaklığı ve basıncı altında gerçekleştirilir (Beşergil,2025).

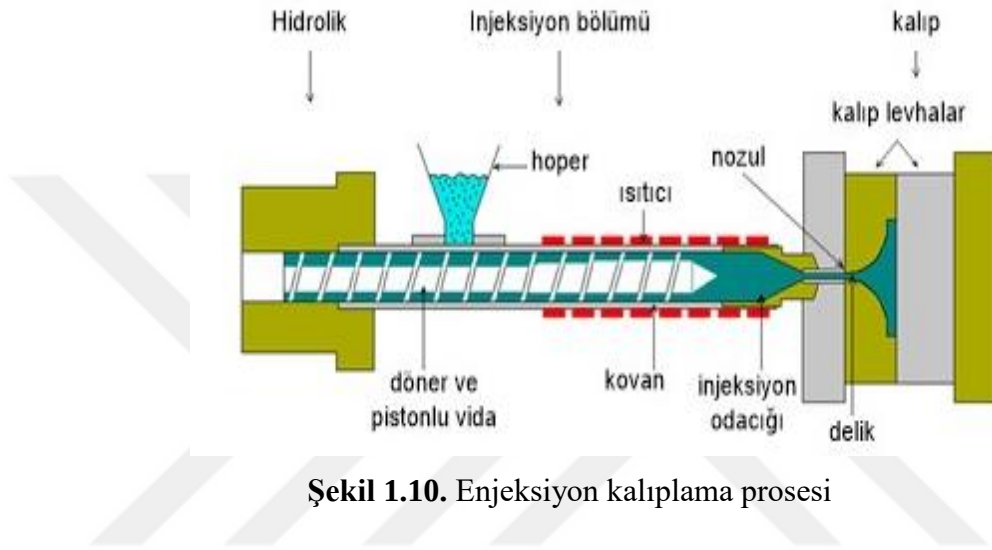


Şekil 1.9. Reçine transfer kalıplama

1.4.3.7 Enjeksiyon Kalıplama

Termoplastik granüller veya toz halindeki hammadde, bir besleme hunisi aracılığıyla enjeksiyon kalıplama makinesine aktarılır. Bu makine, içinde bir Arşimet vidası bulunan elik bir silindirden oluşur; vida, malzemeyi silindir boyunca ilerleterek kalıba taşır. Silindirin dış yüzeyi, ayarlanabilir ısıtıcılarla çevrilidir; malzeme, kontrollü bir sıcaklık gradyanı boyunca ilerlerken erir ve eriyik haldeki termoplastik, ısıtılmış olan kalıp boşluğuna enjekte edilir. Bu sistem genellikle tam otomatik olarak işler (Şekil 1.10.).

Termoplastik enjeksiyon kalıplama sürecinde, kalıplanmış parçalar, sıcaklık malzemenin erime noktasının altına indiğinde son şekillerini alırlar. Bu nedenle, termoplastik enjeksiyon kalıplama operasyonunda kritik adımlar, reçinenin en kısa sürede erime sıcaklığına ulaştırılması (genellikle konik bir vida yardımıyla) ve ardından, kalıp içerisindeyken (soğutularak) sıcaklığın erime sıcaklığının altına düşürülmesidir (Beşergil,2025) .



Şekil 1.10. Enjeksiyon kalıplama prosesi

1.5 Poliamid 6 (PA6) ve Kompozit Malzemeler

PA6, yani poliamid 6, termoplastik polimerler arasında kendine özgü bir yer edinmiştir. Otomotiv ve havacılık gibi alanlarda geniş bir kullanıma sahiptir; yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve mekanik performansı sayesinde sıkça tercih edilen bir materyaldir. Bu özelliklerin yetersiz olduğu durumlarda, PA6'nın ekstra dayanıklılık kazanması için genellikle karbon fiber kullanılmaktadır. Karbon fiber eklemek, çekme dayanımını ve yoğunluğu belirgin şekilde artırarak genel performansı iyileştirmektedir. Araştırmalarda, farklı takviye ile güçlendirilmiş PA6 kompozitlerinin standart PA6'ya göre daha yüksek elastik modül değerlerine ulaştığı sıkça gözlemlenmiştir; bu durum, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır (Gomez vd., 2020).

Kompozit malzemeler, poliamid ve türevlerinin özelliklerini geliştirmekte sıkça karşımıza çıkar. Mekatronik becerilerini artırma potansiyeline sahiptir. Çalışmalar, PA6 kompozitlerine karbon fiber eklenmesiyle üretim süreçlerinde ve

malzemenin mekanik özelliklerinde olumlu sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Örneğin, belirli oranlarda karbon fiberin PA6 matrisinin içinde homojen biçimde dağılması, güçlü fiber arayüz bağlantısı ile çekme ve eğilme mukavemetlerinin artmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, PA6 kompozitlerinin mekanik nicelikleri ile homojen dağılım ve güçlü arayüz bağlantısı sağlayarak aralarında bir denge kurmak, malzeme niteliklerini güçlendirmektedir (Dong vd., 2025). Bu olgular mühendisler ve tasarımcılar için genellikle zorlu bir görev haline gelmektedir.

Görsel materyallerin rolü, bu konunun ayrı bir boyutunu oluşturuyor. PA6'nın karbon fiberle takviyesiyle mekanik performans üzerindeki etkilerini incelerken, laboratuvar ortamında elde edilen deneysel test sonuçları ve grafiksel veriler büyük bir kolaylık sunuyor. Bu tür görseller, işlenmiş PA6 kompozitlerinin yapısal özelliklerini ve dayanıklılığını anlamamıza yardımcı olmanın yanı sıra, araştırma sonuçlarının güvenilirliğini de artırıyor. Örneğin, belirli projelerde sunulan grafikler ve veriler, takviye malzemesinin PA6 kompozitlerinin güçlendirilmesindeki etkilerini net bir şekilde gözler önüne seriyor. Sonuç olarak, bu görsel destekler, karbon fiberin sağladığı avantajları kavramamızda kritik bir öneme sahip olup, zaman zaman vazgeçilmez katkılar sunuyor.

1.5.1 Poliamid 6 (PA6)

Poliamid 6 (PA6), altı karbon atomlu alifatik bir aminokaproik asidin polimerizasyonu ile oluşan ve yaygın olarak Naylon 6 olarak adlandırılan bir termoplastiktir. Yüksek mukavemeti, aşınma direnci ve düşük nem absorpsiyonu, bu malzemenin endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Otomotiv, havacılık, tekstil ve elektronik bileşenlerindeki kullanım alanları, PA6'nın esnekliği ve yapısal sağlamlığına atfedilmektedir. Araştırmacılar, karbon fiber takviyeli kompozitlerde çekme dayanımı ve yoğunluk gibi özelliklerin daha detaylı incelenebildiğini ve bu sayede mekanik özelliklerin geliştirilmesinin mühendislik alanında geniş bir potansiyele sahip olduğunu belirtmektedir. Özellikle karbon fiber ile oluşturulan kompozitler, malzemenin genel performansını artırma potansiyeli sunmaktadır (Karşlı vd., 2013).

PA6'nın işlenebilirliği ve geniş uygulama yelpazesi dikkate alındığında, bu özellikleri kritik önem taşımaktadır. Örneğin, 3B baskı süreçlerinde PA6'nın grafen oksit (GO) gibi katkı maddeleriyle kompozit hale getirilmesi, mekanik ve

termal özelliklerde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Çeşitli çalışmalar, bu takviyelerin polimerin çekme dayanımını önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. Örneğin, %0,1 oranında GO ilavesiyle çekme dayanımında yaklaşık %33'lük bir artış gözlemlenmiş olup, bu durum PA6'nın yapı mühendisliği ve otomotiv sektörlerinde performans iyileştirmeleri için nasıl geliştirilebileceğine dair bir örnek sunmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve nem gibi zorlu çevresel koşullar altında PA6'nın davranışının incelenmesi, malzemenin dayanıklılığını artırmaya yönelik stratejilerin belirlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir (Ichakpa vd, 2023).

PA6'nın makro moleküler yapısı incelendiğinde, karbon fiber ile takviye edildiğinde yapısal mukavemetinde önemli bir artış olduğu görülmektedir. Farklı formüllerde PA6 ve karbon fiberin uyumlu bir şekilde birleştirilmesi, elastik modülün ve çekme dayanımının iyileşmesini sağlayarak daha dayanıklı kompozitlerin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, PA6'nın karbon fiberlerle etkileşimi yalnızca çekme dayanımını değil, aynı zamanda yoğunluk gibi diğer özelliklerini de geliştirerek malzemenin işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir. Örneğin, farklı tipte fiberlerle gerçekleştirilen deneylerde, elastik modülde yaklaşık %600'lik bir artış ve yoğunlukta da artışlar rapor edilmiştir. Bu bulgular, PA6'nın mühendislik uygulamalarında karbon fiber ile kompozit oluşturulmasının performans artışıdaki önemini vurgulamakta ve malzemenin araştırmaların odak noktası haline gelmesine katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, PA6'nın mekanik özelliklerine yönelik bu yaklaşım, malzeme bilimi ve mühendislik alanındaki gelecekteki gelişmeler için umut vadeden bir araştırma alanı sunmaktadır (Dong vd., 2025).

1.5.2 PA6'nın Kimyasal Yapısı ve Sentezi

Poliamid 6 (PA6), mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sentetik bir polimerdir ve bu malzemenin temel çekiciliği, onu bu alanda vazgeçilmez kılan özgün kimyasal yapısından kaynaklanmaktadır. Kaprolaktamın halka açılması polimerizasyonu yoluyla sentezlenmesi, moleküllerin özgün bir bağlanma mekanizmasını ifade eder. Bu yapı, genel olarak yüksek mukavemet, düşük nem alma eğilimi ve dikkat çekici termal kararlılık gibi özelliklerle karakterizedir. Polimer zincirlerinin düzenlenmesi, moleküler ağırlık ve dağılımı, malzemenin mekanik davranışını doğrudan etkilemektedir. PA6'nın sağlam ve

uyumlu yapısı, kompozit tasarımlarında kritik bir rol oynarken, karbon fiber takviyesi ile elde edilen kombinasyon, malzemenin mukavemeti ve yoğunluğunda belirgin bir artış sağlamaktadır.

Fiber ve benzeri takviyeler ile PA6 arasındaki yapısal etkileşim, araştırmaların sıklıkla odaklandığı önemli bir konudur. Takviyelerin PA6 matrisine entegrasyonu genellikle malzemenin elastik modülünü ve çekme dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır (Gomez vd., 2020). Bu çalışmada, bu etkileşimin temel mekanizmaları ve grafen türleri ile yükleme oranlarının PA6 üzerindeki çeşitli etkileri ele alınmıştır. PA6'nın yüksek akışkanlık özelliği, fiberlerin matris içinde homojen bir şekilde dağılmasına olanak tanıyarak nihai ürünün mekanik özelliklerinin optimize edilmesine katkıda bulunmuş ve bu durum performansın artırılmasında belirleyici bir faktör olarak öne çıkmıştır. Dolayısıyla, PA6'nın kimyasal yapısı yalnızca malzemenin dayanıklılığını değil, aynı zamanda işlenebilirliğini de etkileyen temel unsurlardan birini oluşturmuştur.

Sentez sürecinde kullanılan yöntemler, malzemenin nihai özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Örneğin, çift vida ekstrüzyon işlemi, PA6 ile karbon fiber arasında homojen bir karışım elde etmek amacıyla sıklıkla tercih edilmekte ve bu yöntem (Mindivan vd., 2018) gibi kaynaklarda araştırmaları yapılırken, kompozitlerin mekanik test sonuçlarına da değinilmiştir.

Karbon fiber takviye oranları ve işleme parametreleri uygun şekilde optimize edildiğinde, PA6'nın elastik modülü ve genel dayanıklılığı artış gösterebilmektedir. Bununla birlikte, karbon fiber içeriğinin aşırı olması, dolgu malzemesi ile matris arasında karmaşık etkileşimlere neden olarak işlenebilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, PA6'nın kendine özgü kimyasal yapısı ve kullanılan sentez yöntemleri, ileri mühendislik projelerinde dikkatle ele alınması gereken temel faktörler arasında yer almaktadır.

1.5.3 PA6'nın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Poliamid 6 (PA6), mühendislik plastikleri arasında önemli bir yere sahiptir. Hafif yapısı, yüksek mukavemeti ve yüksek sıcaklık dayanımı, çeşitli endüstrilerde kullanımını mümkün kılmaktadır. Saf halde termal bozunma sıcaklığı 426°C'ye kadar ulaşması, termal kararlılığının önemini göstermekte ve bu özelliği PA6'yı makine parçaları ve otomotiv tasarımları için vazgeçilmez kılmaktadır (Abdullah vd., 2024). Elastik modülü ve uzama oranı, malzemenin

mekanik yükler altındaki davranışını belirleyen temel parametrelerdir. Yüksek mukavemeti sayesinde karmaşık geometrilerde dahi serbest şekillendirilebilen PA6'nın bu özellikleri, karbon fiber takviyesiyle daha da belirgin hale gelebilmektedir.

Mekanik performans açısından incelendiğinde, PA6 dikkate değer sonuçlar sunmaktadır. Fakat her takviye PA6 kompozitlerin mekanik değerlerinde artışlar göstermeyebilir. Standart testlerde çekme mukavemeti yaklaşık 48 MPa olarak belirlenirken, kenaf fiber takviyesi bu değeri önemli ölçüde düşürmüştür. Bununla birlikte termal bozunma sıcaklıkları da fiber takviyesi ile düşmektedir (Abdullah vd., 2024). Araştırmalar fiber türü, uzunluğu, üretim yöntemleri gibi faktörlerin önemini ortaya koymaktadır.

Dinamik mekanik analizlerde elde edilen depolama ve kayıp modülleri de takviyesiz PA6 için, karbon fiber takviyeli kompozitlere kıyasla daha düşük değerler sunmaktadır (Karlı, vd., 2013). Ayrıca, yük taşıma kapasitesi ve darbe direnci gibi özellikler, mühendislik uygulamalarında ek avantajlar sağlamaktadır.

Karbon fiber takviyesi, PA6'nın hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Diğer polimerlerle karşılaştırıldığında, özellikle darbe dayanımı gibi kritik alanlarda karbon fiber ilavesiyle malzemenin performansı artma veya azalma gösterebilmektedir. Bu nedenle araştırmalar sürekli devam etmekte, kompozitleri endüstri ve mühendislik alanında gelişmelere açık hale getirmektedir.

Tablo 1.2. imalatla sıklıkla kullanılan bir PA6 malzemesi için mekanik ve fiziksel özelliklerini gösteren tablodur (NCB Plastik Web Sitesi, 2025).

Tablo 1.2. PA6'nın fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	1,12-1,14	g/cm ³
Çekme Dayanımı	40-80	MPa
Elastisite Modülü	700-2600	MPa
Kopma Uzunluğu	30-300	%
Erime Sıcaklığı	210-220	°C

1.5.4 PA6'nın Avantajları ve Dezavantajları

Poliamid 6 (PA6), mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan bir malzemedir. Bu polimerin temel özellikleri arasında yüksek mekanik dayanım, iyi aşınma direnci ve kimyasal maddelere karşı direnç bulunmaktadır. Örneğin, 3B baskı teknolojisiyle entegre edildiğinde, PA6'nın mekanik yapısı kolaylıkla geliştirilebilmekte ve karbon fiber ilavesiyle çekme dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Bu sayede, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitleri, hafiflik ve yüksek mukavemetin gerekli olduğu uygulamalarda avantaj sağlamaktadır (Zhang vd.,2023). Ek olarak, PA6'nın şekillendirilme ve işlenebilme özellikleri endüstriyel tasarımda alternatif bir malzeme olarak değerlendirilmekte ve bu durum, malzemenin mekanik özelliklerinin farklı uygulama gereksinimlerine göre uyarlanmasına olanak tanımaktadır.

Öte yandan, PA6'nın dikkate alınması gereken bazı sınırlamaları da mevcuttur. Örneğin, düşük ısı direnci, özellikle zorlu çevresel koşullarda kullanımını kısıtlayabilmekte ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında deformasyona uğrayabilmektedir. Ayrıca, higroskopik yapısı nedeniyle zaman içinde nemin etkisiyle mekanik özelliklerinde azalma gözlemlenebilmektedir. Bu durum, özellikle uzun ömür ve dayanıklılık gerektiren projelerde sorunlara yol açabilmekte ve genellikle bu malzemenin avantajları ile dezavantajları arasında dikkatli bir denge kurulmasını gerektirmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, PA6'nın güçlü ve zayıf yönleri, hangi uygulamalarda kullanılması gerektiğine dair önemli ipuçları sunmaktadır. Karbon fiber ile güçlendirilmiş PA6 kompozitleri, hafif ve sağlam yapılarıyla birçok endüstriyel ve mühendislik alanında umut vadeden bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, her malzemenin avantajlarının yanı sıra dezavantajlarının da olduğu göz önünde bulundurulmalı ve önerilen projeler için uygun iyileştirmelerin yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak, PA6 ve karbon fiberin kombinasyonu, malzeme bilimi alanındaki ilerlemelere katkıda bulunarak belirli uygulama gereksinimleri için özelleştirilmiş kompozitlerin geliştirilmesini mümkün kılabilir.

1.6 Karbon Fiber ve Karbon Fiber Takviyeli Malzemeler

Son zamanlarda, karbon fiber takviyeli kompozitler mühendislik alanında önemli bir ilgi görmektedir. Bu malzemeler, yüksek mukavemet ve hafif

yapılarıyla birçok endüstride öne çıkmakta ve karbon fiberlerin matris içindeki düzenlenmesi malzemenin bütünlüğünü doğrudan etkilemektedir. Örneğin, poliamid-6 (PA6) matrisine eklenen karbon fiberler çekme dayanımını belirgin bir şekilde artırmaktadır. Araştırmalar, bu yapıların yalnızca mukavemeti artırmakla kalmayıp aynı zamanda yoğunluğu da optimize ederek araç ve makine parçalarında uygulanabilirliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Bu bağlamda, karbon fiber takviyeleri modern mühendislik çözümlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Fiber-matris ara yüzeyi, kompozitlerin performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu etkileşim, yük aktarım verimliliğini etkilemekte ve mekanik özelliklerdeki iyileşmeleri sağlamaktadır. Farklı fiber boyutları ve matris kombinasyonları zaman zaman beklenmedik sonuçlar doğurabilse de genel eğilim yüksek oranda karbon fiber içeren PA6 ve türevi kompozitlerinde elastik modül ve çekme dayanımında artış yönündedir. Ancak, fiber oranının %10'u aşması durumunda işlenebilirlik gibi zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Bu noktada, çeşitli üretim teknikleri ve alternatif malzemeler devreye girmektedir. Boyutlandırma hakkında daha detaylı bilgi Karslı ve arkadaşlarının (2013) çalışmasında verilmiştir.

Genel olarak, karbon fiber takviyeli kompozitler geniş bir uygulama potansiyeline sahip olup, performans iyileştirmelerinde önemli fırsatlar sunmaktadır. Yapısal özellikleri artırma potansiyeli, mühendislik alanındaki yenilikçi araştırmalar için sürekli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Mikro yapısal analizler, tasarım ve üretim yöntemlerinin optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekte, karbon fiber kullanımına yönelik daha yenilikçi yöntemlerin geliştirilmesiyle birlikte, daha hafif ve dayanıklı malzeme seçeneklerinin ortaya çıkması beklenmektedir. Bu durum, özellikle otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde bu malzemelerin heyecan verici alternatifler sunmasına olanak tanıyacaktır.

1.6.1 Karbon Fiber

Karbon fiber, karbon atomlarının düzenli bir şekilde bağlanmasıyla oluşan, dikkat çekici derecede hafif ve aynı zamanda yüksek mukavemetli bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde, havacılık, otomotiv, spor ekipmanları ve genel mühendislik uygulamaları da dahil olmak üzere dünya çapında birçok

tasarım projesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal malzemelerle karşılaştırıldığında, karbon fiberler daha az eğilme ve bükülme eğilimi göstermekte olup, bu davranış yüksek elastikiyet modülü ile ilişkilidir. Ek olarak, kimyasal direnç, termal kararlılık ve ihmal edilebilir düzeydeki termal genleşme, malzemenin uygulama alanlarını daha da genişleten önemli özelliklerdir. Görsel materyaller, karbon fiberin çeşitli uygulamalardaki rolünü ve mühendislikteki önemini açıkça göstermektedir.

Üretim süreci karmaşık olmakla birlikte, karbon fiber genellikle yüksek sıcaklık altında ve çeşitli kimyasal işlemlerle üretilmektedir. Başlangıç aşamasında yaygın olarak kullanılan poliakrilonitril polimeri, karbon fiber haline gelmeden önce ısı ve kimyasal işlemlerle güçlendirilerek daha dayanıklı fiberler elde edilir. Bu yöntem, zahmetli olmasına rağmen fiberlerin mukavemetini önemli ölçüde artırmaktadır. Nihai ürünün özellikleri yalnızca bu işlemle sınırlı olmayıp; fiberlerin çapı, hizalanması ve aralarındaki boşluk miktarı da genel dayanımı etkilemektedir. Mikro yapıdaki detayları vurgulayan görseller, bu önemli noktayı görsel olarak desteklemektedir.

Günümüz mühendisliğinde karbon fiber takviyeli polimer kompozitler, özellikle PA6 (poliamid 6) gibi malzemelerle birleştirildiğinde önemli avantajlar sunmaktadır. Bu iki malzemenin birleşimi sonucunda elde edilen kompozit, mukavemet açısından önemli ölçüde güçlenmekte ve araştırmalar genellikle fiberin hacim oranının artmasıyla doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Daha yüksek oranda karbon fiber kullanımı, çekme dayanımını artırarak daha uzun ömürlü ve sağlam ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde önemli yeniliklere yol açmakta ve karbon fiber tabanlı çözümler giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir. Kompozit malzemelerin mühendislikteki kritik özelliklerini detaylandıran görseller, araştırmanın temel temasını kapsamlı bir şekilde yansıtmaktadır.

1.6.2 Karbon Fiberin Hammaddeleri

Karbon fiber, yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu sayesinde mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında sıklıkla ele alınan bir malzemedir. Karbon fiber hammaddeleri:

- Poliakrilonitril (PAN): En yaygın kullanılan hammaddedir (yaklaşık %90). Sentetik bir polimerdir. Yüksek mukavemet ve

modül sağlar. Havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde tercih edilir.

- Pitch (Zift): Ham petrol veya kömür katranından elde edilir. Pitch bazlı karbon fiberler daha yüksek elastik modül sağlar. Termal iletkenliğin önemli olduğu alanlarda kullanılır (örneğin elektronik donanımlar).
- Rayon: Selüloz bazlı doğal bir polimerdir. İlk kullanılan karbon fiber hammaddesidir. Düşük karbon verimi nedeniyle günümüzde çok nadiren kullanılır.
- Lignin: Ağaç ve bitkisel atıklardan elde edilen doğal bir polimerdir. Düşük maliyetli ve çevre dostu bir alternatiftir. Araştırma aşamasında olup, ticari kullanımı sınırlıdır.

Tablo 1.3. bazı karbon fiber hammaddelerinin özellikleri ve kullanım alanlarını göstermektedir.

Tablo 1.3. Karbon fiber hammadde özellikleri

Hammade	Kaynak	Özellikleri	Kullanım Alanları
PAN	Sentetik polimer	Yüksek mukavemet, çok yönlü	Havacılık, otomotiv
Pitch	Petrol/kömür türevi zift	Yüksek modül, yüksek sertlik	Uzay, yüksek performans
Rayon	Doğal selüloz türevi	Düşük maliyet, düşük performans	Eski ve düşük maliyetli uygulamalar

1.6.3 Karbon Fiberin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Karbon fiber, modern kompozit malzemelerde dikkat çekici bir konuma sahiptir; zira hafifliğinin yanı sıra yüksek dayanım ve mukavemet sunmaktadır. Bu malzemenin düşük yoğunluklu yapısı, özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde tercih sebebi olmaktadır. PA6 ile birleştirildiğinde, fiberin etkisi daha da belirginleşmekte ve bunun sonucunda termal kararlılığın arttığı, yüksek sıcaklıklarda dahi dayanımın korunduğu gözlemlenmektedir. Özetle, bu fiziksel özellikler PA6 kompozitlerinin genel performansını büyük ölçüde belirleyen faktörler arasında yer almaktadır.

Karbon fiberin kimyasal özellikleri de aynı derecede önemlidir. Yüzey özellikleri sayesinde yapıştırıcılar ve diğer polimerlerle uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. Nanoyapılar ve uygulanan yüzey modifikasyonları, kompozitlerin kimyasal direncini artırarak farklı çevresel koşullarda uzun ömürlü ürünlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Birçok çalışma, karbon fiberle güçlendirilmiş PA6 kompozitlerinin su direncine sahip olduğunu ve hatta asidik ortamlarda bile dayanımlarını koruduğunu göstermektedir. Bu durum, malzemenin işlenebilirliği ve uzun vadeli kullanımı üzerinde belirgin, hatta bazı durumlarda hayati etkiler yaratmaktadır. Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, karbon fiberin PA6 kompozitlerine eklenmesi çekme dayanımını, yoğunluğunu ve sertliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Mikroyapısal incelemelerde, karbon fiberin PA6 matrisi içinde homojen bir şekilde dağıldığı ve bu durumun mekanik performansla olumlu yansıdığı tespit edilmiştir. Yük taşıma mekanizmaları ve etkileşimlerindeki bu gelişme, ürünün uygulama alanlarını genişleterek endüstriyel ve mühendislik çözümlerinde karbon fiberin önemli katkılarını ortaya koymaktadır.

Tablo 1.4. Farklı tip karbon fiberler ve özellikleri

TEKNİK ÖZELLİKLER	ARPOWER 300 UD/12K	ARPOWER 300 UD/24K	ARPOWER 600 UD/12K	ARPOWER 600 UD/24K
Elyaf Tipi	12K	24K	12K	24K
Yoğunluk (g/cm³)	1,76-1,80	1,76-1,80	1,76-1,80	1,76-1,80
Elyaf Çapı (µm)	7	7	7	7
Çekme Dayanımı (MPa)	>5500	>4200	>5500	>4200
Elastite Modülü (GPa)	≥250	≥240	≥250	≥240
Kopma Uzaması (%)	1,8	1,8	1,8	1,8

Tablo 1.4 bizlere bir karbon fiber satıcısı firma tarafından verilen farklı tipteki karbon fiberlerin özelliklerini göstermektedir. Birden fazla çeşit ve birden fazla özellikte piyasada kendini gösterebilmektedir (Arfen BRB firması web sitesinden alınmıştır, 2025).

1.6.4 Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Karbon fiberle güçlendirilmiş kompozit malzemeler, endüstrideki birçok uygulama için öne çıkan hafif ve yüksek mukavemetli seçenekler haline gelmiştir. PA6 gibi matris malzemelerle karbon fiberin birleşimi, genel performansı artırmakta; bu kombinasyon sayesinde karbon fiberlerin olağanüstü çekme dayanımı PA6'nın mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmekte ve malzemenin farklı mühendislik alanlarına adaptasyonunu sağlamaktadır. Örneğin, farklı üretim metotlarıyla karbon fiberin PA6 ile bütünleştiği kompozit yapılarında %400 gibi üst düzey çekme dayanımı artışı elde edilebilmektedir (Sun vd., 2023). Bu ve benzeri araştırmalar sonucu karbon fiber özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde geniş uygulama olanakları sunmaktadır.

Bununla birlikte, karbon fiber takviyeli kompozitlerin yeniden işlenebilirliği ve optik özellikleri de önemli avantajlar sunmaktadır. Karbon fiberlerin yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği direnç, malzemenin zorlu koşullara uyum yeteneğini artırmakta, bu da yüksek performans gerektiren uygulamalar için ideal bir özellik teşkil etmektedir. Karbon fiberlerin yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık göstermesi, kompozit elde edilmesi sonucunda bu özelliğin daha da güçlenebileceğine işaret etmektedir. Yapılan analizlere göre kompozitlerde karbon fiberin geri dönüştürülmesi sonucu fiberlerin yine yüksek mekanik özellikler göstermesi devam etmektedir (Irisawa vd., 2018). Bu gözlemler, kompozitlerin gelişen endüstriyel ihtiyaçlara ve artan çevre bilincine adapte olma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

Dikkat çeken bir diğer husus, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerde fiberlerin yerleştirilme ve dağılım şeklidir. Fiberlerin bazen rastgele, bazen de özenle düzenlendiği durumlar kompozitin genel dayanımını artırırken, performansı da optimize etmektedir. Üretim sırasında uygulanan teknikler, örneğin enjeksiyon kalıplama yöntemleri, fiber ile matris arasındaki etkileşimi iyileştirerek malzemenin homojenliğine olumlu katkı sağlamaktadır. Bu tür süreç iyileştirmeleri, karbon fiber takviyeli kompozitlerin endüstride giderek daha fazla tercih edilmesine ve yeni mühendislik fırsatlarının doğmasına zemin hazırlamaktadır. Ayrıca, mevcut görsel referanslar da bu malzemelerin çeşitli uygulamalardaki potansiyelini destekleyici nitelikte sunumlar yapmaktadır.

1.6.5 Mekanik ve Termal Özellikler

Poliamid 6 (PA6) kompozitlerine karbon fiber takviyesi uygulandığında, malzemenin mekanik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler saptanmaktadır. Karbon fiberin matris yapıya entegrasyonu, çekme dayanımında artışa neden olmakta ve bu durum, yapısal mukavemette doğrudan bir kazanım olarak algılanmaktadır. Çeşitli araştırmalar, karbon fiber ve PA6 kombinasyonundan oluşan kompozitlerin, polimer matrisinin bütünlüğünü destekleyerek çekme testlerinde üstün performans sergilediğini göstermektedir. Örneğin, Dong ve arkadaşlarının (2025) tarafından yürütülen çalışmada, optimum karbon fiber oranlarının kullanılmasıyla kompozitlerin çekme dayanımında önemli bir yükseliş gözlemlenmiş olup, bu durumun karbon fiberin yüksek mukavemet özellikleriyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Otomotiv ve havacılık gibi endüstrilerde bu özelliklerin sağladığı faydalar dikkate alındığında, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitler yalnızca mekanik dayanıklılık sunmakla kalmayıp, aynı zamanda hafiflik ve tasarım esnekliği de sağlamaktadır.

Poliamid 6 (PA6) kompozitlerinin bir diğer dikkate değer özelliği darbe direncidir ve karbon fiber takviyesi bu alanda da belirgin gelişmeler sağlayabilmektedir. Darbe dayanımı, malzemenin ani yüklemelere karşı direnç gösterme kapasitesini ifade etmekte olup, genel olarak Poliamid 6 (PA6) termoplastığına karbon fiber ilavesiyle %10 ve %20 oranlarındaki karışımlar için %67 ve %13 azalırken, %30 oranında ise %3,2 değerinde bir artış gerçekleşmiştir (Genç vd., 2017). Karbon fiberin, darbe dayanımına etki ettiği görülmekte fakat karışım oranı önemli bir yer tutmaktadır. Oransal araştırmalar devam etmekte, özellikle yüksek darbe yüklerine maruz kalan bileşenlerde kullanılan kompozitlerin güvenilirliğini ve servis ömrünü uzatarak endüstriyel uygulamalarda hayati bir rol üstlenebilmektedir.

Ele alınması gereken bir diğer önemli husus ise elektriksel iletkenliktir. Karbon fiberin elektrot malzemesi olarak gösterdiği yüksek iletkenlik özelliği, PA6 gibi polimer matrislerde de kendini göstermektedir. Araştırmalar, karbon fiberin kompozit bünyesinde homojen bir şekilde dağılımının, elektrik akımının etkin bir biçimde iletilmesine olanak sağladığını belirtmektedir. Laboratuvar deneyleri de, bu tür kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerlerinde belirgin bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, çeşitli çalışmalar, bu kompozitlerin elektriksel uygulamalarda potansiyel taşıdığını ve gelecekteki

teknolojik ilerlemelere katkıda bulunabileceğini işaret etmektedir. Elektriksel iletkenliğin mekanik dayanım ve hafiflikle birlikte sunduğu kombine performans, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin çeşitli uygulama alanlarında kullanımını oldukça cazip hale getirmektedir.

Mekanik özelliklerden çekme dayanımının karbon fiber artışı ile arttığını gösteren bir örnek Doğru ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada bizlere sunulmuştur (Tablo 1.5.)

Tablo 1.5. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin çekme dayanımı

Karbon Fiber Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
0	31,69
10	48,73
20	62,39

1.6.6 Korozyon Direnci, Hafiflik Avantajı ve Çevresel Dayanıklılık

Poliamid 6 (PA6) kompozitlerine karbon fiber ilavesi, belirgin birçok avantaj sunmaktadır. Öncelikle, bu malzemenin korozyon direnci artmaktadır; karbon fiberin kendine özgü kimyasal özellikleri, su, asit ve diğer aşındırıcı maddelerle temas halinde yapıyı korumaktadır. Denizcilik veya kimya endüstrilerinde bu kompozitlerin kullanımı, dayanıklılık sayesinde uzun ömürlü ve güvenilir yapılar ortaya çıkarmakta, bakım maliyetlerini azaltarak genel ekonomik bir kazanç sağlamaktadır. Dolayısıyla, PA6 kompozitlerinin üretim sürecinde, korozyon etkilere karşı ek bir koruma katmanı oluşmakta ve bu durum, bazı uygulamalarda beklenmedik olumlu sonuçlara yol açmaktadır.

Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin bir diğer önemli özelliği ise düşük yoğunluklarıdır. Karbon fiber, geleneksel malzemelere kıyasla önemli ölçüde daha hafif bir yapıya sahiptir; bu da kompozitlerin toplam ağırlığını azaltmaktadır. Otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde ağırlık azaltmak, genellikle yakıt verimliliğini artırarak performansı iyileştirmektedir. Taşıma ve montaj işlemleri de azalmış ağırlık sayesinde kolaylıklar sunmakta; yüksek çekme dayanımının bu hafiflik avantajıyla birleşimi, esnek mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitler sürdürülebilirlik açısından da dikkat çekmektedir. Hem karbon fiberin hem de PA6'nın geri dönüştürülebilir özellikleri, kaynakların daha etkin kullanımını sağlayarak çevre dostu yaklaşımları desteklemektedir. Bu malzemeler, değişken çevresel etkilere uyum sağlayabilmekte ve biyolojik parçalanabilme özellikleri gibi kriterler de dikkate alınarak tasarlanabilmektedir. Dolayısıyla, düşük yoğunluk ve korozyon direncinin birleşimi, çevresel etkiyi azaltıp atık miktarını düşürmektedir. Denizcilikte ve modern mühendislikte bu nedenler kritik bir öneme sahiptir.

Liang ve arkadaşları (2013) farklı karbon fiber oranın PA6 kompozitlerine mekanik özelliklerine etkisini incelemiş ve bu artışların yeni kompozitlerde bize avantajlar sağladığını göstermiştir. (Tablo 1.6.).

Tablo 1.6. PA6/Karbon fiber kompozitlerin çekme dayanımı sonuçları

Karbon Fiber Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
0	74
10	97
15	103
20	110

1.6.7 Kullanım Alanları ve Endüstriyel Uygulamaları

PA6 esaslı karbon fiber kompozitler, düşük yoğunluklarına rağmen yüksek mukavemetli yapılarıyla birçok sektörde kendine yer bulmaktadır. Otomotiv endüstrisinde malzemenin yakıt verimliliğini artırdığı ve ağırlık tasarrufu sağladığı düşünülürken, havacılıkta zorlu koşullar altında performansı sürdürmesi önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Karbon fiberin polimer matrisine entegrasyonu çekme dayanımını önemli ölçüde artırmakta; örneğin, yüksek sıcaklık dayanımıyla bilinen PA6, otomotiv parçaları ve dış mekân uygulamaları için ideal kabul edilmektedir. Bununla birlikte, üretim sürecindeki hassasiyetler malzeme seçiminde titizlik gerektirdiğini göstermekte ve bu kompozitler genellikle yenilikçi mühendislik çözümlerine olanak tanımaktadır.

Spor ve rekreasyon alanında ise durum daha da çeşitlenmektedir. Ekipmanların hafifliğinin yanı sıra, kullanıcıların performans beklentileri de

dikkate alınmaktadır. Bisiklet çerçeveleri, kayaklar veya tenis racketleri gibi ürünlerde karbon fiber ilavesiyle elde edilen mukavemet ve esneklik, ürünlere farklı bir boyut kazandırmaktadır. Tasarım sürecinde sıklıkla kullanılan 3B yazıcılar ve filamentler, ekipmanın kişiselleştirilmesine olanak tanırken, çözüm yelpazesini de genişletmektedir. Sonuç olarak, bu alandaki malzeme tercihleri, kullanıcıların özel ihtiyaçlarına uygun özelleştirilmiş ürünlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır.

İnşaat sektöründe ise karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin kendine özgü bir yeri bulunmaktadır. Yapısal elemanlarda yaygın olarak kullanılan bu malzeme, taşıyıcı sistemlerin güvenliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Karbon fiberin eklenmesi yalnızca mekanik performansı güçlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda yapısal bütünlüğü de korumaktadır; örneğin, yüksek performanslı binaların ve köprülerin inşasında bu özellikler devreye girmektedir. Tribolojik performans analizleri, malzemenin deformasyon altındaki davranışını ortaya koyarak, mühendislerin daha bilinçli tercihler yapmasına yardımcı olmaktadır. Özetle, bu kompozitler, inşaattan tasarıma kadar birçok alanda yenilikçi çözümler sunmakta ve mühendislik uygulamalarına önemli katkılar sağlamaktadır.

1.6.8 Havacılık, Otomotiv ve Savunma Sanayisindeki Kullanımı

Karbon fiberle güçlendirilmiş PA6 kompozit malzemeler havacılık, otomotiv ve savunma alanlarında önemli bir ilgi görmektedir. Bu malzemeler, yüksek dayanımı düşük ağırlıkla birleştirme potansiyelleri sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir; örneğin, uçak gövdelerinde kullanılan bu yapısal elemanlar, yakıt verimliliğini artırıp işletme maliyetlerinde önemli azalmalar sağlamaktadır. Düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet, mühendislerin gereksinimlerini karşılarken, aynı zamanda tasarımda yaratıcı çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Otomotiv sektöründe de karbon fiberin sağladığı düşük yakıt tüketimi ve performans artışı, üreticiler tarafından yakından takip edilmekte ve yenilikçi projelerin temelini oluşturmaktadır.

Savunma sanayinde ise PA6 kompozitlerinin sunduğu avantajlardan yoğun bir şekilde yararlanılmaktadır. Askeri araçlar ve teçhizatın tasarımında, düşük ağırlık ve yüksek mukavemetin birlikte sağladığı faydalar belirgin bir şekilde hissedilmektedir; zira bu malzemeler geleneksel alternatiflere kıyasla %20-30

daha az ağırlığa sahipken, çekme mukavemetinde de üstün performans sergileyebilmektedir. Yapılan araştırmalar, farklı karbon fiber tiplerinin kompozitlerin mekanik özelliklerini kademeli olarak nasıl iyileştirdiğini ve bu sayede zırh koruması ile yapısal dayanımda önemli artışlar sağladığını göstermektedir. Bu yüksek performanslı malzeme, savunma projelerinde güvenliği artırırken tasarımda da esneklik sunmaktadır.

Piyasa talebindeki artış genel olarak bu yeniliklerden kaynaklanmakta ve üretim süreçlerinin optimizasyonu her açıdan önem arz etmektedir. Örneğin, 3B yazıcılarla gerçekleştirilen üretim yöntemleri, maliyetleri düşürürken üretim hızını artırmakta ve sıra dışı tasarım olanakları sunmaktadır. İleri teknoloji görselleri, bu malzemelerin endüstriyel üretimdeki yeniliklerini gözler önüne sermektedir. Elbette, karbon fiber üretimindeki maliyetler de dikkate alınmalı; zira bu durum, tasarım sürecinde elde edilen kazanımların ürün fiyatına olumsuz yansımaması için dikkatli bir yönetimi gerektirmektedir. Sonuç olarak, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin sağladığı inovasyon ve performans artışı, havacılık, otomotiv ve savunma gibi stratejik sektörlerde rekabet gücünü artırmaya devam etmektedir.

Tablo 1.7. havacılık otomotiv ve savunma sektörlerinde karbon fiberlerin nerelerde kullanıldığını, fiziksel, mekanik ve maliyet performansı özelliklerinde ne gibi katkılar sağladığını gösterilmektedir.

Tablo 1.7. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin sektörel kullanımı

Sektör	Kullanım Alanı	Ağırlık Azaltma (%)	Mukavemet Artışı (%)	Maliyet Tasarrufu (%)
Havacılık	Uçak Gövdesi	20	30	15
Otomotiv	Araç Şasisi	25	35	18
Savunma	Zırh Plakaları	30	40	22

1.6.9 Medikal, Spor Ekipmanları ve Diğer Mühendislik Uygulamaları

Karbon fiberle desteklenmiş kompozit malzemeler, medikal alanda kullanım açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Örneğin, cerrahi sütür veya yara kapama ürünlerinde bu materyallerin sunduğu mukavemet ve hafiflik, hastaların iyileşme sürecine olumlu katkıda bulunmaktadır. Modern tıbbi

tekstillerde sıklıkla karşılaşılan bu fiber ve kumaşlar, biyomedikal uygulamalara olan katkılarını yinelemektedir. Cerrahi prosedürlerin çeşitli aşamalarında bu tür kompozitlerin entegrasyonu, işlevselliği artırırken, protez ve ortopedik uygulamalarda dayanıklılığı yükselterek medikal mühendislik alanında önemli faydalar sağlamaktadır. Genel olarak karbon fiberle güçlendirilmiş poliamid 6 kompozitleri, modern tıbbi çözümlerin kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Spor ekipmanları bağlamında ise karbon fiberle desteklenmiş kompozitler, performansı artırma ve ağırlığı azaltma konusunda oldukça etkili olabilmektedir. Spor ekipmanlarında bu malzemelerin kullanımı, dayanıklılıkları ve hafif yapıları sayesinde sporcuların hareket kabiliyetine katkıda bulunmakta ve bazı durumlarda beklenenin ötesinde olumlu sonuçlar vermektedir. Karbon fiberin sunduğu yüksek spesifik sertlik ve mukavemet, ekipmanların daha hafif olmasını sağlayarak sporcuların maksimum performansa ulaşmalarında rol oynamaktadır. Ayrıca, bu kompozitlerin mekanik özellikleri, ekipmanların uzun ömürlü olmasına yardımcı olarak kullanıcı ihtiyaçlarını büyük ölçüde karşılamaktadır. Elde edilen veriler, havacılık veya otomotiv mühendisliğinde olduğu gibi, spor mühendisliğinde de başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Görsel materyaller bu bağlamda, spor ekipmanlarında karbon fiber kullanımına dair dikkat çekici örnekler sunmaktadır.

Diğer mühendislik dallarında, özellikle PA6 kompozitlerin enerji emme kapasitesi yapı ve inşaat mühendisliğinde belirgin avantajlar sunmaktadır. Bu malzemeler, düşük yoğunluklarına rağmen yüksek enerji soğurma yeteneğine sahip olup, yapısal uygulamalarda kritik bir özellik olarak kabul edilebilmektedir. Otomotiv endüstrisinde ise karbon fiber içeren kompozitlerin kullanımı, yalnızca ağırlıktan tasarruf sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda güvenlik ve dayanıklılığı da artırmaktadır. Görsel materyaller, bu tür malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini gösteren önemli örnekler teşkil etmektedir. Enerji yapılarının optimizasyonu ve yanma direncinin artırılmasıyla, otomotiv ve diğer mühendislik alanlarında bu kompozitlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Sonuç olarak, bu malzemelerin mühendislik ve teknolojik projelerde geniş yer bulması, sürdürülebilir ve yüksek performanslı ürünlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Tablo 1.8. bizlere karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin uygulama alanlarını ve sağladığı avantajları göstermektedir.

Tablo 1.8. Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin uygulama alanları

Uygulama Alanı	Örnek Ürün	Avantaj	Mukavemet Artışı (%)
Medikal	Protezler	Hafiflik	35
Spor Ekipmanları	Tenis Raketleri	Yüksek Dayanım	45
Otomotiv	Araç Gövde Parçaları	Yakıt Verimliliği	40
Havacılık	Uçak İç Panelleri	Ağırlık Azaltma	50

1.7 Literatür Taraması

Yakın zamanda karbon tiplerinin PA6 kompozitlerine etkisi Dong ve arkadaşları (2025) tarafından araştırılmıştır. Araştırmada iki farklı tipte T300 ve T700 fiberlerini kullanarak farklı oranlarda karışımlar elde edip teknik incelemelerini yapmıştır. Ekstrüzyon ile üretme işlemi sonucunda çekme ve eğilme özelliklerinde gözle görülür farklar elde etmiştir. Çekme dayanımında takviyesiz PA6 için yaklaşık 70 Mpa değerini ölçtükten sonra değerlendirmede özellikle T300 ile olan kompozit için yaklaşık %240 artış gözlemlemiştir. Fiber uzunluğu T700 fiberleri ile arttırılınca ise çekme dayanımındaki artışı kaydetmiştir. Sonuç olarak karbon oranı ve fiber uzunluğu arttıkça çekme dayanımının arttığını bizlere göstermektedir.

Doğru ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada karbon fiber ve farklı tipteki fiberlerin farklı sıcaklıklar altında mekanik özelliklerine etkisini araştırmış ve fırınlama yapmadan elden edilen sonuçlar doğrultusunda farklı orandaki eklemelerde PA6 kompozitinin çekme dayanımına belirgin artışlar gözlemlemiştir (Tablo 1.9.).

Tablo 1.9. Çekme dayanımı test sonuçları

Karbon Fiber Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
0	31,69
10	48,73
20	62,39

Bir başka çalışmada (Yetgin vd., 2020), poliamid 6 (PA6) esaslı çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) takviyeli PA6/ÇDKNT nanokompozitleri geliştirilmiştir. ÇDKNT takviyesinin, nanokompozitlerin mekanik özellikleri

üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çekme, eğilme ve darbe dayanımı testleri uygulanmıştır. Nanotakviyelerin PA6 matrisi içerisinde homojen şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla PA6 ve ÇDKNT karışımı, enjeksiyon makinesi kullanılarak kalıplama yöntemiyle standart test numuneleri üretilmiştir. Deneysel bulgular, ÇDKNT oranındaki artışın PA6 matrisinin mekanik özellikleri üzerinde anlamlı değişimlere yol açtığını göstermiştir. Özellikle, artan ÇDKNT içeriğiyle birlikte çekme dayanımında %5,79, eğilme dayanımında %16 ve elastisite modülünde %7,8 oranında artış gözlenmiştir. Buna karşılık, darbe dayanımı %11,2 ve şekil değiştirme kabiliyeti %988 oranında azalma göstermiştir. Bu sonuçlar, ÇDKNT'nin PA6 matrisindeki mekanik performansı güçlendirme potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda tokluk özellikleri üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğini de işaret etmektedir.

Genç ve arkadaşları (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada ise %10, %20, %30 fiber oranlarında karışımlar elde edilip enjeksiyon makinesi ile imalatları gerçekleştirilmiştir. İncelemelerinin sonucunda fiber oranına bağlı olarak malzeme yoğunluğundaki (Tablo 1.10.) ve çekme dayanımındaki (Tablo 1.11.) artışlar kaydedilmiştir.

Tablo 1.10. Karbon fiber takviyesin yoğunluğa etkisi

Takviyesiz PA6	1,12 g/cm ³
%10 karbon fiber takviyeli PA6	1,16 g/cm ³
%20 karbon fiber takviyeli PA6	1,20 g/cm ³
%30 karbon fiber takviyeli PA6	1,23 g/cm ³

Tablo 1.11. Karbon fiber takviyesinin çekme dayanımına etkisi

Katkısız PA6	71,6 MPa	Referans
%10 karbon fiber takviyeli PA6	105 MPa	%46 artış
%20 karbon fiber takviyeli PA6	146 MPa	%105 artış
%30 karbon fiber takviyeli PA6	169 MPa	%137 artış

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Karbon fiberlerle güçlendirilmiş PA6 esaslı kompozit materyallerin mekaniksel niteliklerinin incelenmesinde deneysel ve analitik metotlar temel bir işlev görmektedir. Söz konusu metotlar, örnek materyallerin hazırlanmasından başlayıp test süreçlerine kadar uzanan çeşitli evreleri kapsamaktadır. Kompozit yapıların gerilme mukavemetini artırma potansiyeline sahip olan karbon fiberlerin yanı sıra, PA6 polimerinin kendine özgü özellikleri de bu etkileşimde belirleyici bir faktördür. Çalışmalar, numune üretiminde uygulanan tekniklerin ve kullanılan malzeme özelliklerinin, elde edilen sonuçlar üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Örneğin, kalıp sıcaklığı, basma basıncı, numunenin geri dönüştürülmüş olması, malzeme fırınlama sıcaklığı gibi koşullar numunelerin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, tasarlanan kompozitlerin mekaniksel özelliklerinin optimizasyonuna olanak tanımaktadır. Bu çerçevede, ilgili metotların derinlemesine irdelenmesi, gelecekte benzer materyallerin geliştirilmesine öncülük edebilecektir. Karbon fiber takviyesinin PA6 kompozitleri üzerindeki etkilerini saptamak amacıyla uygulanan deneysel prosedürler, çeşitli testleri içermektedir. Özellikle, materyalin mukavemet ve yoğunluk değerlerinin ölçülmesinde çekme testleri ön plana çıkmaktadır. Bu testler, kompozitlerin mekaniksel özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Ek olarak, bu testlerden elde edilen veriler, kullanılan karbon liflerinin niteliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Uzun dönemli dayanıklılık ve performans analizleri için farklı uygulama senaryoları dikkate alınmalıdır. Fused Deposition Modeling (FDM) gibi yenilikçi üretim teknolojileri, bu hususlarda avantaj sunmakta ve kompozitlerin güçlendirilmesine dair kapsamlı bir anlayış sağlamaktadır. Bu süreçler, kompozitlerin tasarım aşamasında ve uygulama potansiyelinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Bu nedenle, deneysel bulguların analizi, endüstriyel uygulamalara yön verebilmektedir. Son olarak, karbon liflerinin PA6 kompozitleriyle olan etkileşiminin anlaşılması, bu materyallerin sürdürülebilirlik ve bozunum süreçleri üzerindeki etkilerinin de değerlendirilmesini gerektirmektedir. Farklı çevresel koşullar, polimerlerin fiziksel ve kimyasal yapısında değişimlere neden olabilmekte, bu durum da nihayetinde kompozitlerin kullanım ömrünü ve dayanıklılığını etkilemektedir. Bu tür analizler, kompozitlerin uzun vadeli

performansının iyileştirilmesi için gerekli verileri sunmaktadır. Ayrıca, çeşitli üretim ve modifikasyon teknikleri vasıtasıyla, bu materyallerin dayanıklılığı ve işlevselliği artırılabilir. Bu bağlamda, biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerin araştırılması, karbon fiber takviyeli kompozitlerin çevresel etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunabilecektir. Dolayısıyla, deneysel ve analitik yöntemler, bu materyallerin gelişimi ve sürdürülebilirliği açısından hayati bir öneme sahiptir.

2.1 Hammadde Özellikleri

2.1.1 PA6 Granül Özellikleri

PA6 granülleri sahada aktif olarak kullanılan bir markadan temin edilip süreçte matris fazı olarak kullanılmıştır. Katalog değerlerinde aralık olarak değerler verilmiştir. Bunun nedeni çekme dayanımı nem alma işlemi yapılmadan imalatı gerçekleştirilen bir üründe 30 N/mm² gelirken kurutması yapılmış bir üründe bu değer 60 N/mm² değerine kadar yükselebilmektedir.

Matris olarak kullanılan olan ürün EPLON 6 NC Q101 marka granüllerdir (Fotoğraf 2.1.). Tablo 2.1.'ye göre hammaddelerde fırınlama işlemi yapılmadığı için katalog değerlerinde alt değerler baz alınmıştır (NCB Plastik Web Sitesi, 2025).

Tablo 2.1. Testlerde kullanılan PA6 özellikleri

Ürün	PA6
Marka	EPLON 6 NC Q101
Çekme Dayanımı	30-60 N/mm ²
Yoğunluk	1,11-1,14 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	210-230 ⁰ C
Enjeksiyon Sıcaklığı	240 ⁰ C
Nem Oranı	20%
Fırınlama Süresi	2-4 saat
Fırınlama Sıcaklığı	80 ⁰ C



Fotoğraf 2.1. PA6 granülleri

2.1.2 Karbon Fiber Özellikleri

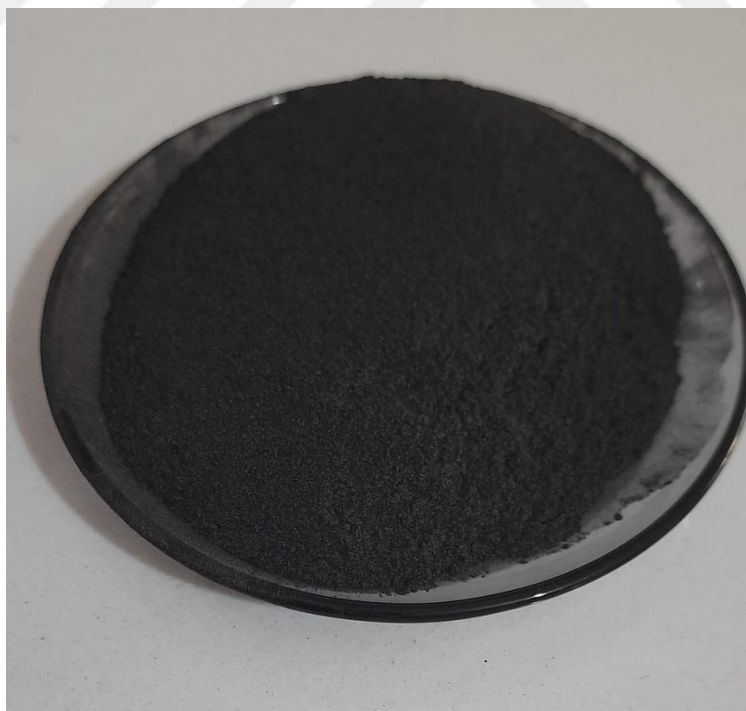
Takviye elemanı olarak iki farklı uzunlukta 3 mm (Fotoğraf 2.2.) ve 0,08 mm (Fotoğraf 2.3.) karbon fiberler kullanılmıştır. Tablo 2.2. ile karbon fiberlerin katalog değerleri gösterilmiştir (Toray Grup Web Sitesi, Sigrafil Web Sitesi, 2025). Fiberler kütlece %10 ve %20 oranında PA6 ile karıştırılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.2. Testlerde kullanılan karbon fiber özellikleri

Ürün	3 mm fiber	0,08 mm fiber
Marka/Model	Toray/T300	Sigrafil/M80-3
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	3530	3000
Yoğunluk (g/cm ³)	1,76	1,8
Çap (mm)	0,007	0,007
Uzunluk (mm)	3	0,08



Fotoğraf 2.2. Karbon fiber 3 mm



Fotoğraf 2.3. Karbon fiber 0,08 mm

2.2 İmalat Yöntemi

Test numunelerinin içeriğinin homojen bir yapı olması için sonsuz vida modeline göre çalışan bir enjeksiyon kalıp makinesi ile imalatı gerçekleştirildi. Karışım hazneye geldikten sonra ekstruder içerisinde karışması sağlandı. Bunun için Fotoğraf 2.4.'te olan Ekin Marka 160 Orion model plastik enjeksiyon makinesi kullanıldı (Ekin Makine Web Sitesi, 2025).



Fotoğraf 2.4. Kullanılan Ekin 160 Orion enjeksiyon makinesi

Tablo 2.3. Ekin 160 Orion enjeksiyon makinesi özellikleri

Makine Modeli / Orion 160	Birim	A	B	C
Vida Çapı	mm	35	40	45
Vida Boy / Çap Oranı	L/D	22,8	20	17,8
Teorik Enjeksiyon Hacmi	cm ³	192	251	318
Enjeksiyon Ağırlığı (PS)	g	175	231	292
Enjeksiyon Oranı	g/s	80	105	130
Plastikleştirme Kapasitesi (PS)	g/s	12	15	20
Enjeksiyon Basıncı	MPa	245	190	154
Vida Devir Hızı	rpm		0-280	
Vida Stroğu	mm		200	

2.3 Numunelerin Hazırlanması

Karbon fiber takviyeli hazır numuneler bulunmakla birlikte üretim sürecinde oran ve fiber uzunluklarına hükmetmemiz açısından kompozit malzemelerin hammaddelerinin karışımı tarafımızdan hazırlandı. Bunlar için sektörde sıklıkla kullanılan PA6 granül hammaddeler ve farklı uzunlukta liflere sahip takviye karbon fiberler kullanıldı. Karışımlar enjeksiyon makinesinin döner mili sayesinde homojen olarak karıştırılıp kalıplara basımı gerçekleştirildi.

2.4 Karbon Fiber Takviyeli PA6 Kompozitlerinin Üretim Süreci

Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin imalat süreci, çeşitli metotların bütünleşmesini gerektiren kompleks bir aşamadır. Bu süreç, öncelikle yüksek nitelikli karbon liflerinin seçimiyle başlamaktadır. Seçilen uygun fiberler, mekaniksel ve termal özellikleri iyileştirmek amacıyla PA6 ile bir araya getirilmektedir. Özellikle karbon liflerinin, kompozitin mekaniksel mukavemetini ve yoğunluğunu etkileyen kritik bir rol üstlendiği saptanmıştır. Üretim sürecinin ilk evrelerinde, liflerin PA6 matrisiyle etkin bir şekilde bütünleşebilmesi için uygun sıcaklık ve basınç koşulları temin edilmelidir. Bu bağlamda, yüksek erime noktası ve bozunma sıcaklıkları gibi özellikler, PA6'nın kimyasal direnci açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Abdullah vd., 2024). Son olarak, karbon fiber takviyesinin PA6 kompozitlerindeki mekaniksel performansı artırıcı etkisi, üretim sürecinin çıktısı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Karbon liflerinin derinlemesine incelenmesi, liflerin homojen dağılımının sağlanması ve özenle tasarlanmış bir matris yapısının oluşturulmasıyla mekaniksel özelliklerin daha da iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Kompozitlerin çekme mukavemeti ve yoğunluğu üzerine yapılan çalışmalarda, liflerin PA6 ile olan etkileşimi sonucunda, bu özelliklerde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin üretim süreci, yalnızca malzeme seçiminde değil, aynı zamanda sürdürülebilir uygulamaların entegrasyonunda da kritik bir öneme sahiptir.

Üretim sürecinde PA6 matris ile 3 mm ve 0,08 uzunluğundaki karbon fiberlerin ayrı ayrı %10 ve %20 oranındaki karışımları enjeksiyon makinesinde basılmak üzere hazırlandı.

Üretimde PA6 malzeme için fırınlama yapılmamış ve makinede döner mil sayesinde karışarak gelen hammaddelerden takviyesiz olan PA6 için kalıp

sıcaklığı 30°C, fiberli katkıları için 40°C’de iken basma işlemine geçildi. Takviyesiz PA6 granüller için kalıp sıcaklığının daha düşük olmasının nedeni içerisinde kendisi haricinde eriyik veya katı halde herhangi bir madde olmamasındandır. Malzeme basma sıcaklığı katalog değeri 240° C’de ve fiberli hammaddeler için 35 bar basınç, 20 m/dk hız ile kalıba basılmıştır. Takviyesiz PA6 için de 30 bar ve 15 m/dk hız seçilmiştir. Ütöleme hızı 10 m/dak ve 20 bar olarak ayarlanmıştır. Sonuçta istenilen test numunelerinin imalatı başarı ile gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 2.5.).



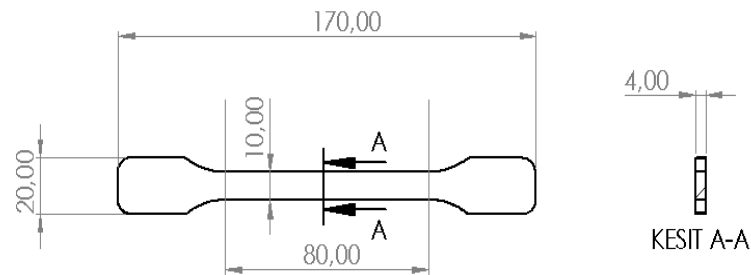
Fotoğraf 2.5. İmalatı gerçekleştirilen test numuneleri

2.5 Numune Şekillendirme ve Standartlara Uygunluk

Kompozit materyallerin mekaniksel niteliklerini belirleyen kritik bir evre olan numune şekillendirme süreçleri, PA6 kompozitleri karbon fiber takviyesiyle birlikte kullanıldığında etkisini daha da artırmaktadır. Şekillendirme aşamasında, karbon fiberlerin homojen bir biçimde dağılımı ve uygun bir şekilde yönlendirilmesi, nihai ürünün mukavemetini ve yoğunluğunu doğrudan etkileyebilmektedir. Örneğin, farklı karıştırma tekniklerinin uygulanması, fiberlerin kompozit içerisindeki dağılımını değiştirerek, mekaniksel özelliklerde belirgin farklılıklar meydana getirebilmektedir. Gelişmiş karıştırma metodları, fiberlerin daha iyi bir şekilde dispersiyonunu sağlarken, yüzey sertliğini de artırabilmektedir. Bu noktada, Ghirmatsion ve diğerleri (2024) tarafından desteklenen araştırmalar, uygun şekillendirme stratejilerinin PA6 kompozitlerinin mekaniksel özelliklerini nasıl iyileştirebileceğine dair değerli bilgiler sunmaktadır.

Karbon fiber takviyeli materyallerin şekillendirilmesinde, standartlara uygunluk da önemli bir husustur. Herhangi bir uygulama veya üretim sürecinde, belirli standartlara riayet edilmesi, ürünün güvenilirliğini artırırken, kalite kontrolünü de temin etmektedir. Özellikle, PA6 kompozitlerinin üretiminde kullanılan standart metotlar, malzemenin kalitesini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Son olarak, numune şekillendirme ve standartlara uygunluk, yalnızca mekaniksel performans açısından değil, aynı zamanda endüstriyel üretim hızını da etkileyen faktörlerdir. Karbon fiber takviyesi, malzemenin hafifliği ve dayanıklılığı sayesinde, ulaşım gibi sektörlerde kullanımını artırmaktadır. Bu nedenle, şekillendirme metotlarının yanı sıra, bu süreçte kullanılan malzemelerin özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, her bir şekillendirme tekniğindeki optimizasyon seviyesinin artırılması, kompozitin genel performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Bu noktada, karışım teknikleri ve üretim süreçlerinin geniş bir yelpazede değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu sayede, PA6 kompozitleri üzerindeki karbon fiber etkisinin potansiyeli tam anlamıyla ortaya çıkarılabilir.

Bunlara bağlı olarak geliştirilen ISO 527-4 polimer ve polimer matrisli fiber takviyeli malzemelerin çekme özelliklerini tayin etmekte kullanılan bir standarttır. Bu standartta ölçülendirmeler yapılmış (Şekil 2.1.), kalıp tasarlanmış (Fotoğraf 2.6) ve numuneler elde edilmiştir. Elde edilen üçer numune üzerinden çekme testleri ve yoğunluk testleri gerçekleştirilip ortalama verilere göre değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 2.1. ISO 527-4 çekme testi numunesi ölçüleri



Fotoğraf 2.6. ISO 527-4'e uygun olarak üretilmiş enjeksiyon kalıbı

2.6 Deneysel Yöntemler

Oluşturulan kompozit malzemelerin fiber dizilimlerini görmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), çekme dayanımı belirlemek için çekme testi yöntemi ve yoğunluk ölçümleri için de dansimetre kullanılmıştır.

2.6.1 Çekme Testi Yöntemi

Çekme testi Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) test laboratuvarında Shimadzu AGS-X marka çekme cihazı ile gerçekleştirildi. ISO 527-4'e uygun olarak elde edilen kalıp ile standartta uygun şekil ve ebatta üretilen numuneler çekme testlerine tabi tutuldu (Fotoğraf 2.7.). Numunelerin çekme hızı 5 mm/dk olarak gerçekleştirildi. Çekme testi her bileşen için 3 numune üzerinden ve ortalamaları alınarak değerlendirmeye tabi tutuldu.



Fotoğraf 2.7. Çekme testi cihazı

2.6.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), örneklerin yüzey morfolojisini ve topografyasını elektron demetleri kullanarak yüksek çözünürlükte görüntüleyebilen gelişmiş bir mikroskopi tekniğidir. Milyon kata varan büyütme yeteneği ve nanometre düzeyinde çözünürlüğü sayesinde, optik mikroskopların erişemediği detayları ortaya koyar (Fotoğraf 2.8.). Bu özelliği, SEM'i özellikle malzemelerin yüzey karakterizasyonu, mikroyapısal analizi ve elementel bileşiminin belirlenmesi gibi uygulamalarda vazgeçilmez bir araç haline getirmiştir. Elde edilen detaylı bilgiler, bilimsel ve endüstriyel araştırmalarda temel bir rol oynayarak modern bilimin ilerlemesine önemli katkılar sağlamaktadır.

SEM görüntüleri BİTAM test laboratuvarında Hitachi SU-1500 marka çekme cihazı ile gerçekleştirildi. Numunelerdeki fiberlerin, SEM cihazından elde edilen görüntülerde üç boyutlu olarak nasıl bir yerleşim gösterdikleri incelendi.



Fotoğraf 2.8. SEM cihazı

2.6.3 Yoğunluk Ölçümü

Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerinin yoğunluk özellikleri üzerindeki etkisi, mühendislik ve malzeme bilimi disiplinlerinde önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Yoğunluk analizleri, kompozitlerin mekaniksel performansını belirlemede kritik bir role sahiptir. Özellikle, karbon fiberle güçlendirilmiş PA6 kompozitleri, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk nitelikleriyle dikkat çekmektedir. Bu kompozitlerin çeşitli uygulamalarda daha verimli bir şekilde kullanılması, malzeme geliştirme süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır.

Yoğunluk ölçümü dansimetre ile 3 numune ortalaması alınarak yapıldı.

2.7 Teorik bilgiler

2.7.1 Teorik Yoğunluk Hesaplama

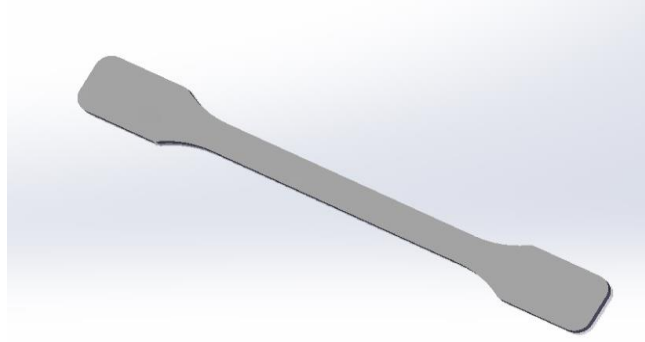
Deneyssel olarak elde edilen veriler teorik olarak da hesaplanmıştır. Yoğunluk için kullanılan denklem aşağıda verilmiştir. Şekil 2.2. tasarımı yapılan numuneyi göstermektedir.

ρ =Yoğunluk

m=Kütle

V=Hacim

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$



Şekil 2.2. Test numunesi tasarım

2.7.2 Kompozit Malzeme Mekaniği

Birbiri içerisinde çözülmeden bir matrisin içinde takviye elemanı olarak kullanılan malzemelerin oluşturduğu yapıya kompozit malzeme denmektedir. Kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenirken fiber, matris dağılım özelliklerinin yanında üretim yöntemlerinin iyi bilinmesi gerekir. Zira sonuçlar çok değişkenlik gösterebilir.

2.7.2.1 Teorik Hacim

Fiber ve matristen oluşan yapılar için aşağıdaki sembolik ifadelerden yola çıkarak (Callister, 2020),

v_c =Kompozit hacmi

v_f =Fiber hacmi

v_m =Matris Hacmi

V_f =Fiber hacim oranı

V_m =Matris hacim oranı

V_c =Kompozit hacim oranı

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2.2)$$

ve

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.3)$$

Hacim oranları toplamı,

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.4)$$

Denklem (2.4) den,

$$V_f + V_m = V_c \quad (2.5)$$

elde edilir.

2.7.2.2 Teorik Yoğunluk

Hacim oranları bilinen kompozit malzemelerin yoğunluğu aşağıdaki denklemle hesap edilir.

V_f =Fiber hacim oranı

V_m =Matris hacim oranı

V_c =Kompozit hacim oranı

ρ_f = Fiber yoğunluğu

ρ_m = Matris yoğunluğu

ρ_c = Kompozit yoğunluğu

Denklem (2.5) deki hacim oranları da kullanılarak,

$$\rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m = \rho_c \quad (2.1)$$

elde edilir.

2.7.2.3 Teorik Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı teorik olarak hesaplanırken kompozit fiberlerinin sürekli, süreksiz, dağınık olma gibi durumları göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 2.3.). Çekme dayanımını, liflerin dizilimi ve sürekliliği büyük ölçüde etkilemektedir. Kuvvetin fiberin boyuna veya dikine olması da formülleri çeşitlendirebilmektedir (Callister,2020).

kompozitlerin mekanik davranışını anlamak ve tasarlamak açısından büyük önem taşır. Fiber boyunun uzunluğu matristeki tutunma oranına etki etmektedir. Bundan dolayı formüllerde fiber boyunun kritik fiber boyunun üzerinde ve altında olmasına göre karışımlar kuralı uygulanmaktadır.

l_f =Fiber uzunluğu

d =Fiber çapı

σ_f = Fiber çekme dayanımı

l_k =Kritik fiber boyu uzunluğu

τ_{fm} =Fiber ve matris arasındaki kayma gerilmesi

V_f =Fiber hacim oranı

V_m =Matris hacim oranı

σ_f = Fiber çekme dayanımı

σ_m = Matris çekme dayanımı

σ_c = Kompozit çekme dayanım

Kritik fiber uzunluğu hesaplanırken,

$$l_k = \frac{d \cdot \sigma_f}{2 \cdot \tau_{fm}} \quad (2.3)$$

formülü kullanılır.

Eğer $l_f > l_k$ ise fiber doğrultusundaki çekme dayanımı formülümüz,

$$\sigma_c = V_f \cdot \sigma_f \cdot \left(1 - \frac{l_k}{2 \cdot l_f}\right) + V_m \cdot \sigma_m \quad (2.4)$$

olarak kullanılır.

Eğer $l_f < l_k$ ise fiber doğrultusundaki çekme dayanımı formülümüz,

$$\sigma_c = V_f \cdot \left(\frac{l_f \cdot \tau_{fm}}{d}\right) + V_m \cdot \sigma_m \quad (2.5)$$

olarak kullanılır.

Bizim kompozit üretimimiz enjeksiyon ile gerçekleştirildiğinden dolayı takviye elemanlarımızın dağılımı süresiz ve dağınık olarak gerçekleşmiştir.

Sürekli ve dağınık fiber takviyelerde çekme dayanımı için modifiye edilmiş bir karışım kuralı kullanıldı (Callister, 2020; Krenchel, 1964). Her ne kadar fiberlerin enine ve dikine yönelimleri tahmin edilemez olsa da bu formül bize yaklaşık değerler vermiştir. Burada denklemini kurarken fiber matris arası kayma gerilmesi, matrisin akma mukavemetinin yarısı olarak kabul etmiştir.

l_f =Fiber uzunluğu

d =Fiber çapı

σ_f = Fiber çekme dayanımı

l_k =Kritik fiber boyu uzunluğu

τ_{fm} =Fiber ve matris arasındaki kayma gerilmesi

V_f =Fiber hacim oranı

V_m =Matris hacim oranı

σ_f = Fiber çekme dayanımı

σ_m = Matris çekme dayanımı

σ_c = Kompozit çekme dayanım

C = Üç boyutlu fiber dağılımının olduğu kompozitlerde sabit çarpan (1/5),
İki boyutlu dağılımlarda (3/8) alınır.

$X = l_f > l_k$ ise $\left(1 - \frac{l_k}{2.l_f}\right)$, $X = l_f < l_k$ ise $\left(\frac{l_f}{2.l_k}\right)$ olarak alındı.

$$\sigma_c = C.V_f. \sigma_f .X + V_m. \sigma_m \quad (2.6)$$

Öncelikle, kritik fiber uzunluğu hesabı yapıldı,

$$l_k = \frac{d.\sigma_f}{2.\tau_{fm}} \quad (2.7)$$

(2.12) denkleminde elde edilen veriye göre (2.11) formülü düzenlendi.

Eğer $l_f > l_k$ ise,

$$\sigma_c = C.V_f. \sigma_f .\left(1 - \frac{l_k}{2.l_f}\right) + V_m. \sigma_m \quad (2.8)$$

$l_f < l_k$ ise,

$$\sigma_c = C.V_f \cdot \sigma_f \cdot \left(\frac{l_f}{2.l_k} \right) + V_m \cdot \sigma_m \quad (2.9)$$

formülleri elde edildi.



3. BULGULAR

Ekin Marka 160 Orion model plastik enjeksiyon makinesi ile ISO 527-4 standartlarına göre kapalı kalıp ve hacimde test numunelerinin imalatı gerçekleştirilmiştir. Sonuçta karşılaştırmalarda kullandığımız takviyesiz PA6, kütlece %10 ve %20 oranında 3 mm ve 0,08 mm fiberler ile ayrı ayrı takviye edilmiş numune kompozitler elde edilmiştir.

3.1 Yoğunluk Analizi Sonuçları

Yoğunluk deneysel ve teorik olarak karşılaştırıldığı için kütle ve hacim oranları belirlendi.

3.1.1 Kütle Değerleri

Üretimi gerçekleştirilen ürünler hassas terazide tartılarak kütleleri ölçülmüştür. Test numunelerindeki miktarlar Tablo 3.1. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kütlece karbon miktarları

Test Materyali	Toplam Kütle (g)	Kütlece Karbon Miktarı (g)	Kütlece PA6 Miktarı (g)
Takviyesiz PA6	9,81	0	9,81
PA6 / %10 – 0,08 mm fiber	10,72	1,072	9,648
PA6 / %20 – 0,08 mm fiber	11,65	2,33	9,32
PA6 / %10 – 3 mm fiber	10,14	1,014	9,126
PA6 / %20 – 3 mm fiber	10,80	2,16	8,64

3.1.2 Kütle ve Hacim oranları

Elde edilen kütle değerleri yoğunluk formülü (2.1) kullanılarak hacim ve hacim oranları elde edilmiş ve Tablo 3.2. üzerinde verilmiştir.

Tablo 3.2. Kütle ve hacim oranları

Test Materyali	Kütlece Karbon Oranı	Kütlece PA6 Oranı	Hacimce Karbon Oranı V_f	Hacimce PA6 Oranı V_m
Takviyesiz PA6	0	1,0	0,00	1,00
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	0,1	0,9	0,07	0,93
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	0,2	0,8	0,14	0,86
PA6 / %10- 3 mm fiber	0,1	0,9	0,06	0,94
PA6 / %20- 3 mm fiber	0,2	0,8	0,13	0,87

3.1.3 Teorik ve Deneysel Yoğunluk

Deneysel yoğunluk dansimetre yardımı ile ölçülüp yazılmıştır. Teorik sonuçlar içinse elde edilen teorik hacim oranlarından yola çıkarak ilgili denklemde (2.6) yerine yazılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar Tablo 3.3. teorik sonuçlar ise Tablo 3.4. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Deneysel yoğunluk ölçüm sonuçları

Test Materyali	Yoğunluk (g/cm ³)
Takviyesiz PA6	1,12
PA6 / %10 - 0,08 mm fiber	1,14
PA6 / %20 - 0,08 mm fiber	1,17
PA6 / %10 - 3 mm fiber	1,13
PA6 / %20 - 3 mm fiber	1,19

Tablo 3.4. Teorik yoğunluk hesap sonuçları

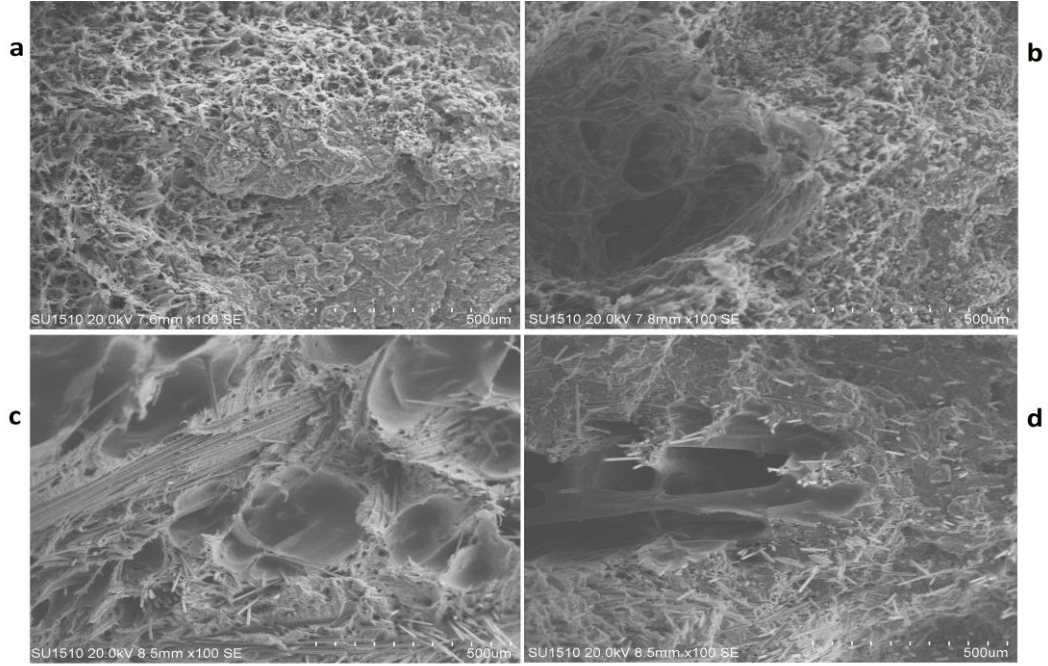
Numune	Karbon Fiber		PA6		Kompozit Yoğunluk (g/cm ³)
	Yoğunluk (g/cm ³)	V _f	Yoğunluk (g/cm ³)	V _m	
Takviyesiz PA6	1,76	0	1,11	1	1,11
PA6 / %10 - 0,08 mm fiber	1,76	0,07	1,11	0,93	1,156
PA6 / %20 - 0,08 mm fiber	1,76	0,14	1,11	0,86	1,201
PA6 / %10 - 3 mm fiber	1,8	0,06	1,11	0,94	1,151
PA6 / %20 - 3 mm fiber	1,8	0,13	1,11	0,87	1,200

3.2 SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Görüntüleri

Elde edilen SEM görüntüleri (Fotoğraf 3.1.) incelenmiş ve enjeksiyon ile üretim metodu sonucu olarak süreksiz ve dağınık yerleşmiş fiber yapısı gözlenmiştir. Bu tespit sonucu ilgili eşitliklerde (2.13 ve 2.14) C katsayısının 0,2 kabul etmiş ve hesaplamalar yapılmıştır.. Fotoğraflarda 0,08 mm fiberle takviye edilen numunelerin fiber dağılımı matrise, 3 mm fibere kıyasla daha homojen olduğu görülmüştür.

Kopma yüzeylerinden elde edilen görüntüleri incelerken, kopma yüzeyindeki sıyrılma bölgelerine baktığımızda %20- 3 mm olan kompozit yapının

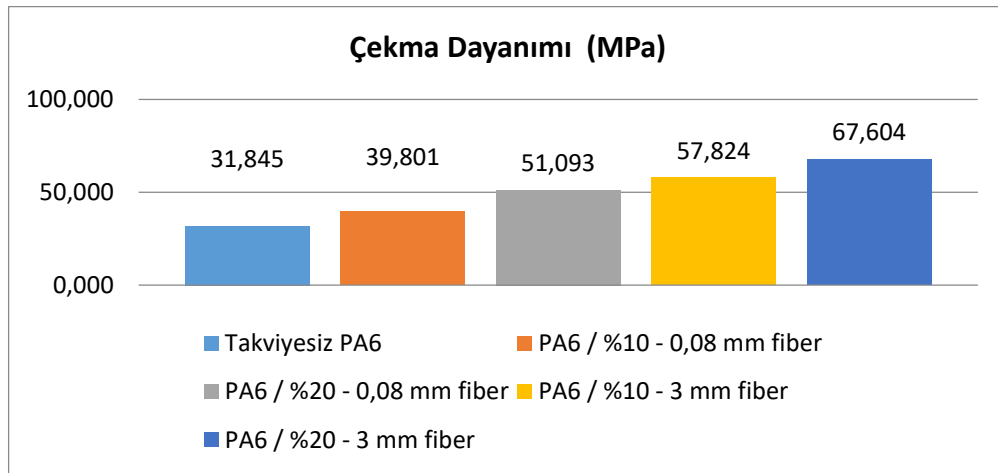
diğer oran ve uzunluklara göre fiber ara yüz tutunmasına olumlu bir etki gösterdiği kopmayı zorlaştırdığı çekme mukavemetini arttırdığı görülmüştür.



Fotoğraf 3.1. Kopma yüzeyi SEM görüntüleri

- a) PA6 / %10 - 0,08 mm fiber katkılı kompozit kopma yüzeyi SEM görüntüsü
- b) PA6 / %20 - 0,08 mm fiber katkılı kompozit kopma yüzeyi SEM görüntüsü
- c) PA6 / %10 - 3 mm fiber katkılı kompozit kopma yüzeyi SEM görüntüsü
- d) PA6 / %20 - 3 mm fiber katkılı kompozit kopma yüzeyi SEM görüntüsü

3.3 Çekme Deneyi Sonuçları



Grafik 3.1. Çekme dayanımı test sonuçları

Çekme testinde elde edilen verilen işlenmiş çekme dayanımı grafiği oluşturmuştur. (Grafik 3.1.). Grafikteki değerler çekme mukavemetlerini göstermektedir. Bu grafiğe göre;

Takviyesiz PA6: 31,8 N/mm²'lik bir gerilme vermiş ve sonuç olarak katalog değeri olan 30 N/mm²'ye çok yakın bir değer almıştır.

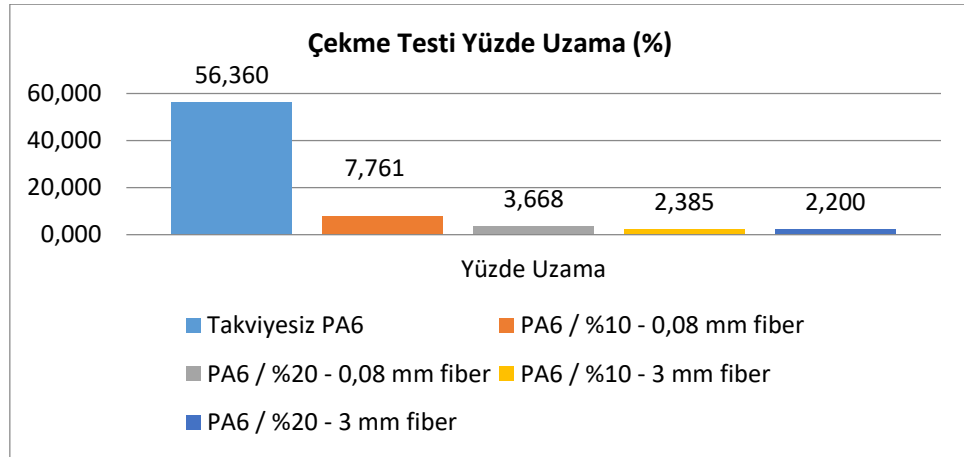
PA6 / %10-0,08 mm Karbon Fiber: 39,8 N/mm²'lik çekme dayanımı, takviyesiyle belirgin bir artış gösterir. Bu artış, karbon fiberin PA6 matrisine katkı sağlamaya başladığını gösterir.

PA6 / %20-0,08 mm Karbon Fiber: 51,1 N/mm²'lik daha yüksek bir çekme dayanımı, karbon fiber oranının artmasıyla daha fazla kuvvet transferi sağlandığını ve malzemenin dayanıklılığının arttığını gösterir.

PA6 / %10-3 mm Karbon Fiber: 57,82 N/mm²'lik ile daha yüksek bir dayanım sağlanmıştır. Lif takviyesi, fiber boyu uzayınca daha etkili olmuştur, çünkü liflerin uzunluğu artınca matrise bağlanmasını kolaylaştırmış, malzemenin gerilme dayanımını daha verimli bir şekilde arttırmıştır.

PA6 / %20 3 mm Karbon Fiber: 67,6 N/mm² ile en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Bu, %20 oran ve daha uzun karbon fiber lif takviyesi ile PA6 kompozitlerinin çekme dayanımını en yüksek değere taşımıştır. Elde ettiğimiz maksimum sonuç, ilgili SEM görüntülerine baktığımız zaman (Fotoğraf 3.1.) fiber-matris ara yüzeyinde de desteklenmektedir.

Uzama değerlerini incelediğimiz zaman ise yüzde uzama takviyesiz halde %56,4 değerlerindeyken, kompozit halde en fazla %10-0,08 mm fibere sahip kompozitte %7,76, en az uzama ise %20- 3 mm fiberli kompozitte gerçekleşmiştir. (Grafik 3.2.).



Grafik 3.2. Deneysel toplam yüzde uzama sonuçları

Bu bulgular, karbon fiber takviyesinin fiber boyu arttıkça PA6 kompozitlerinin çekme dayanımını önemli ölçüde artırdığını ve fiber oranı arttıkça çekme dayanımının daha da güçlendiğini göstermektedir. %20 lif takviyesi, en yüksek çekme dayanımını sağlarken, PA6'nın doğasında mevcut olan sınırlamaları aşarak malzemenin kullanım alanını genişletmiştir.

3.3.1 Çekme Dayanımı Teorik Hesaplama

Çekme dayanımı ile ilgili hesaplamalar yapılırken enjeksiyonla üretimin sonucu olarak test numunesindeki fiberler süreksiz ve dağınık bir dağılım gösterdiği için modifiye edilmiş karışımlar formülü kullanılmıştır (Krenchel, 1964).

Bunlar için ilk önce fiberlerin kritik uzunluk değeri hesapları denklem (2.12) ile yapılmıştır. Tablo 3.5. kritik fiber uzunluğu hesaplaması için gerekli verileri ve sonucunu gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Teorik kritik fiber uzunlukları hesaplama sonuçları

Numune	Karbon Fiber Kritik Fiber Uzunluğu				
	τ_{fm} (Mpa)	d (mm)	l_f (mm)	Fiber Çekme Dayanımı (MPa)	l_k (mm)
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	14	0,007	0,08	3000	0,75
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	14	0,007	0,08	3000	0,75
PA6 / %10- 3 mm fiber	14	0,007	3	3530	0,88
PA6 / %20- 3 mm fiber	14	0,007	3	3530	0,88

Elde edilen kritik fiber uzunluklarının fiber boyundan küçük olması durumunda ilgili denklem (2.13), büyük olması durumunda ise (2.14) kullanılmıştır. C değeri 0,2 çarpan olarak alınmış, fiber matris kayma gerilmesi ise akma dayanımının yarısı kabul edilmiştir. Tablo 3.6 ile teorik çekme dayanımı için gerekli veriler ve sonuçlar gösterilmiştir. Yüzde artış olarak Tablo 3.7.’de gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Teorik çekme dayanımı hesaplama sonuçları

Numune	Karbon Fiber					PA6		Teorik Çekme Dayanımı (MPa)
	C	T _{fm} (Mpa)	l _k (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	V _f	Çekme Dayanımı (MPa)	V _m	
Takviyesiz PA6	-	-	-	-	0	30	1	30,00
PA6 / %10 - 0,08 mm fiber	0,2	14	0,75	3000	0,07	30	0,93	30,14
PA6 / %20 - 0,08 mm fiber	0,2	14	0,75	3000	0,14	30	0,86	30,28
PA6 / %10 - 3 mm fiber	0,2	14	0,88	3530	0,06	30	0,94	64,33
PA6 / %20 - 3 mm fiber	0,2	14	0,88	3530	0,13	30	0,87	104,38

Tablo 3.7. Teorik çekme dayanımı yüzde artışlar

Numune	Teorik Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Artış %
Saf PA6	30,00	Referans
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	30,14	0,46
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	30,28	0,93
PA6 / %10- 3 mm fiber	64,33	114,43
PA6 / %20- 3 mm fiber	104,38	247,93

Eşitlik (2.12) kullanılarak yapılan hesaplamalarda 0,08 mm fiberler için 0,75; 3mm olan fiberler için 0,88 kritik fiber boyu hesaplanmıştır. Sonuçlara bakarak kritik fiber boyu fiberden uzun olan 0,08 mm fiberli karışımlarda (2.14) eşitliği; kritik fiber boyu fiberden kısa 3 mm olan fiberlerde ise (2.13) eşitliği kullanılmıştır. Sonuçlar kritik fiber boyunun teorik hesaplamadaki önemini ve fiberin yük aktarma yeteneğini göstermektedir. Fiber boyunu kritik fiber

boyundan uzun olması çekme dayanımına maksimum 3 mm fiber ve %20 oranlık karışımımızda etki etmiştir.

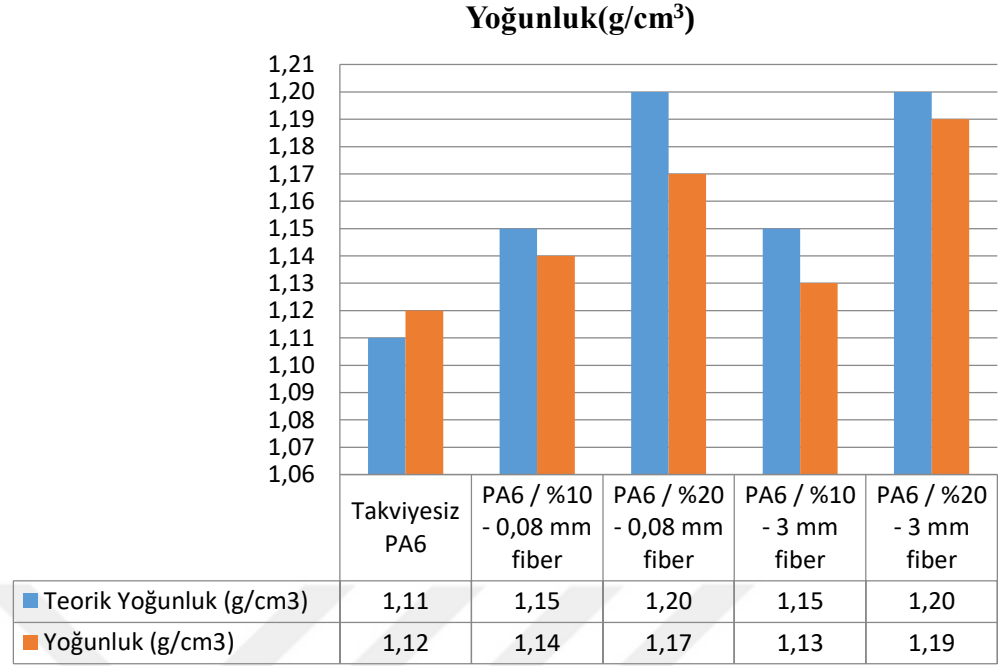
3.4 Verilerin Değerlendirilmesi

Testler yapılmış ve teorik hesaplamalar elde edilmiştir. Elde edilen bulgular birlikte değerlendirilerek analizi yapılmıştır.

3.4.1 Yoğunluk Sonuçları

Sonuçlara teorik olarak bakıldığında zaman $1,11 \text{ g/cm}^3$ olan PA6 kompozit yoğunluğu %10 ve %20 fiber takviyesinde sırası ile yaklaşık $1,15 \text{ g/cm}^3$ ve $1,20 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Fiberlerin oranlarının yoğunluğa katkısı görülmüştür. Oranların artması yoğunluğu artırırken fiber uzunluğunu değişmesi teorik olarak bir etki göstermemiştir (Grafik 3.3.).

Diğer tarafta deneysel olarak elde edilen sonuçlara baktığımızda fiber oranlarının artması yoğunluğu yine arttırmış ve grafiğe göre (Grafik 3.3) sırasıyla takviyesiz PA6 $1,12 \text{ g/cm}^3$ takviyeli PA6'lar ise $1,14 \text{ g/cm}^3$, $1,17 \text{ g/cm}^3$, $1,13 \text{ g/cm}^3$, $1,19 \text{ g/cm}^3$ değerleri elde edilmiştir. 0,08 mm fiberli ve 3 mm fiberli katkılara baktığımızda kendi içlerinde oranlara bağlı olarak yoğunluk artmıştır. Fiberlere oransal olarak bakarak %10 katkılı fiberleri ayrı %20 katkılı fiberleri ayrı kendi içerisinde değerlendirdiğimizde %10 katkılıda 0,08 mm uzunluktaki fiberler üretim esnasında 3 mm olan fiberlere kıyasla PA6 ile daha iyi bir karışım oluşturmuş ve yoğunluğa daha fazla katkı sağlamıştır. Katkı oranı %20 olunca 3 mm olan fiberler daha iyi bir karışım göstermiş ve yoğunluğa 0,08 mm olana göre daha fazla katkı sağlamıştır (Grafik 3.3.).



Grafik 3.3. DeneySEL ve teorik yoğunluk sonuçlarının karşılaştırılması

Teorik ve deneysel sonuçlara birlikte baktığımızda ikisinde de katkı oranları arttıkça yoğunluğu arttırmış ama teorik verilerde fiber uzunluğu ve üretim yöntemi yoğunluk üzerine bir etki göstermemiştir. DeneySEL yaptığımız çalışmada ise fiber uzunlukları ve üretim metodu da yoğunluğa etki etmiş ve numune üzerinde yoğunluğu artıran ama düzenli olmayan bir sonuç vermiştir.

SEM görüntülerini içeren fotoğraflara (Fotoğraf 3.1.) baktığımız zaman kısa fiberlerin uzun fiberlere kıyasla daha homojen bir şekilde dağıldığı ve boylarının çaplarına çok yakın olmasından dolayı matrise daha düzenli yayıldığı görülmüştür.

Bütün bunlar üretim koşullarıyla birlikte değerlendirdiğinde kısa fiberlerin enjeksiyon kalıbına akışının daha kolay olduğunu ve yerleşimlerinin daha düzgün olmasına neden olduğu görülmüştür.

Teorik sonuçlar ile deneysel sonuçları yüzdesel olarak kıyasladığımızda teorik sonuçlar hemen hemen deneysel sonuçların iki katı daha iyi durumda olduğu görülmüştür (Tablo 3.8.). SEM görüntülerine de baktığımız zaman üretim metodundaki karışım oranı ve liflerin boylarındaki farklılıkların ve üretim metoduna bağlı olarak bazı fiberlerin kırılmasının etkili olduğu görülmektedir (Fotoğraf 3.1.).

Tablo 3.8. Teorik ve deneysel yoğunluk sonuçlarını yüzde artışları

Test Materyali	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Teorik Yüzde Artış %	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Deneysel Yüzde Artış %
Takviyesiz PA6	1,11	Referans	1,12	Referans
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	1,156	3,60	1,14	1,8
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	1,201	8,10	1,17	4,5
PA6 / %10- 3 mm fiber	1,151	3,60	1,13	0,9
PA6 / %20- 3 mm fiber	1,200	8,10	1,19	6,3

3.4.2 Çekme Testi Sonuçları

Elde edilen çekme testi sonuçlarında PA6 takviyesiz haldeyken kopma kuvveti 1273,81 N iken bu değer karbon oranı kütleli %10 ve %20 olarak eklendiğinde belirgin artışlar elde edilmiştir (Tablo 3.9.). Elde edilen bu kuvvet artışları neticesinde Takviyesiz PA6'nın çekme dayanımı 31,85 MPa iken tabloya göre sırasıyla 39,80 MPa, 51,09 MPa, 58,82 MPa, 67,60 MPa değerlerine kadar yükselmiştir. Yükseliş herhangi belli bir oranda olmamış kütleli %10'luk fiber ve %20'lik fiber katkıları arasında benzer kuvvetler elde edilmemiştir. Elde edilmemesinin sebepleri fiber uzunluklarının matris içerisindeki dağılımlarının kontrol edilememesidir. SEM görüntüleri sonucu, enjeksiyonla üretim fiber katkı matrislerde süreksiz ve dağınık dağılım göstermekte, bazı fiberler kırılmakta ve sonucunda da orantısız bir artış vermektedir. Buna rağmen fiber uzunluğunun artması çekme dayanımında gözlemlenebilir bir artışa neden olmuştur

Tablo 3.9. Çekme testi sonuçları

Materyal	Kopma Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzama (mm)	Yüzde Kopma Uzama %
Takviyesiz PA6	1273,81	31,85	61,44	56,36
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	1592,03	39,80	8,54	7,76
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	2043,72	51,09	4,03	3,67
PA6 / %10- 3 mm fiber	2312,95	57,82	2,62	2,39
PA6 / %20- 3 mm fiber	2704,14	67,60	2,42	2,20

Test sonuçlarına göre katkı oranı arttıkça test numunelerinin yüzde uzamaları azalmıştır. Oran olarak aynı olan fiberleri kıyasladığımızda ise fiber

boyu arttıkça bu değerlerin daha da düştüğü görülmüştür. Fiber oranı ve uzunluğunun artması fiberlerin matrise tutunmasını kolaylaştırmış ve uzamalarını engellemiştir.

3.4.3 Teorik ve Deneysel Çekme Dayanımı Sonuçları

Elde edilen teorik ve deneysel çekme dayanımı sonuçlarına göre (Tablo 3.10);

Takviyesiz PA6: Elde edilen PA6 numunesinin çekme testi sonucu çekme dayanımı 31,85 MPa olarak ölçülmüş ve minimum katalog değeri olarak verilen 30 MPa değerine yakın bir değer bulunmuştur. 31,85 MPa çekme dayanımı hammaddemizde fırınlama yapmadığımız için doğru bir değer olup minimum değerinin üstünde kalmıştır.

PA6 / %10- 0,08 mm fiber: Çekme testi sonucu 39,80 MPa olarak elde edilen değer teorik olarak (2.14) eşitliği ile hesap edildiğinde 30,14 MPa olarak hesaplanmıştır. SEM fotoğraflarına (Fotoğraf 3.1.) bakarak değerlendirme yaptığımız zaman 0,08 mm fiberler diğer fiber uzunluklarına göre daha homojen bir dağılım göstermiş yapıya daha iyi bir katılım sağlamıştır. Üç boyutta düzensiz, dağınık olarak bir dağılım göstermesi ve fiber uzunluğunun kritik fiber uzunluğundan kısa olmasına rağmen teorik değerden yüksek bir değer elde edildiği görülmüştür. Sebebinin üretim hataları ve fiber boy çap ilişkisine bağlı olarak matriste daha homojen bir dağılım göstermesi olarak görülmüştür. Eşitlikte (2.14) C çarpanı ile yapılan işlemler, bu yapı için minimum değeri bulmamıza yardımcı olmuştur.

PA6 / %20- 0,08 mm fiber: Test sonucumuz çekme dayanımında 51,09 MPa elde edilmiştir. Teorik sonucumuz (2.14) eşitliğine göre hesap edildiğinde 30,28 MPa olarak elde edilmiştir. SEM fotoğraflarına baktığımız zaman (Fotoğraf 3.1.) yine aynı boy ve %10'luk karışım gibi uzun fiberlere kıyasla homojen bir karışım sergilemiştir. Teorik ve deneysel çekme sonucu arasındaki fark ise daha artmıştır. Orana bağlı olarak artan bu değerler, üretim hataları ve C çarpanı etkisi ile bir önceki karışımımızda olduğu gibi teorikte minimum değer olarak ölçülmüştür.

Tablo 3.10. Teorik ve deneysel çekme dayanımı sonuçları

Numune	Teorik Kompozit Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Artış (%)	Deneysel Kompozit Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Artış (%)
Takviyesiz PA6	30,00	Referans	31,85	Referans
PA6 / %10- 0,08 mm fiber	30,14	0,43	39,80	24,97
PA6 / %20- 0,08 mm fiber	30,28	0,93	51,09	60,50
PA6 / %10- 3 mm fiber	64,33	114,43	57,82	81,53
PA6 / %20- 3 mm fiber	104,38	247,94	67,60	112,25

PA6 / %10- 3 mm fiber: Test sonucu 57,82 MPa olan elde edilen çekme dayanımı teorik olarak (2.13) eşitliğine göre hesap edildiğinde 64,33 MPa olarak hesap edilmiştir. Fiber uzunluğu kritik fiber uzunluğunu geçtiği için referans değerimizle olan fark belirgin bir şekilde artmıştır. Bu fark deneysel ve teorik değerleri karşılaştırdığımızda 0,08 mm fibere göre daha yakın olmasına rağmen teorik değer bu sefer daha yüksek kalmıştır. SEM fotoğraflarına baktığımız zaman (Fotoğraf 3.1) fiber boyunun artması karışımı 0,08 mm fibere oranla daha heterojen bir yapı haline getirmiştir. Fiber boyunun artması çekme dayanımımıza avantaj sağlamış fakat teorik olarak sonuçla kıyasladığımız zaman fiberlerin birbirine yapışması, birlikte hareket etmesi, daha heterojen matriste dağılım göstermesi ile üretim hataları da birleşmesi dezavantaj olarak yansımıştır. Bütün bunlar teorik hesabı maksimum değer olarak almamıza neden olmuştur.

PA6 / %20- 3 mm fiber: Çekme dayanımı deneysel olarak 67,6 MPa olarak ölçülmüş teorik ise (2.13) eşitliğine göre 104,38 MPa olarak hesap edilmiştir. Teorik ve deneysel arasındaki fark aynı uzunluk ve farklı orandaki karışımımıza göre daha fazla artmış ve teorik hesap yüksek kalmıştır. SEM fotoğrafında (Fotoğraf 3.1.) süreksiz ve dağınık yapıları fiberlerimizin daha heterojen bir dağılım gösterdiği görülmüştür. 3 mm ve %10 oranındaki karışımımız gibi bu da aynı özellikleri göstermiş ve üretim hataları ile bu kriterler birleşince teorik hesap maksimum düzeyde kalmıştır.

Sonuç olarak fiber boyu ve oranının artması çekme dayanımını arttırmış, teorik verilerden de kıyasla enjeksiyonla üretim yönteminin fiberlerde süreksiz ve dağınık yerleşimlere sebep olmuş ve bu dağılıma hükmedilememiştir. Bütün bunların yanında fiber boyunun matriste dağılımını homojen veya heterojen olarak

büyük ölçüde etkilediği görülmüş ve üretim hataları ile de birleşince ikisi arasındaki farklar oluşmuştur. Bu yerleşimler fiber boyu arttıkça süreksiz ve dağınıklığını arttırarak çekme dayanımı arasındaki farkın yükselmesine sebep olmuştur.



4. TARTIŞMA

4.1 PA6 Matrisli Karbon Fiber Takviyesinin Yoğunluğa Etkisi

Karbon fiber takviyesinin yoğunluk özellikleri üzerindeki etkisi, PA6 kompozitlerinin mekanik performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Karbon fiber yoğunluğunun 1.80 g/cm^3 civarında olduğu ve bu fiberlerin milimetrik çapının $0,007 \text{ mm}$ civarında olduğu göz önüne alındığında, bu takviyelerin PA6 ile birleştiğinde sağladığı yapısal güç artışı dikkat çekicidir. Tablo 4.1. başka bir uygulamanın sonuçlarını göstermektedir (Genç, A., 2017).

Tablo 4.1. Karbon fiber oranının yoğunluğa etkisi

Karbon Fiber Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)
0	1.14
10	1,16
20	1,20
30	1,23

Karbon fiber uzunluğunun numuneler üzerinde bir etkisi olmaması düşünülürken SEM fotoğrafları (Fotoğraf 3.1.) üretim metodundan kaynaklanan karbon liflerinin matris içindeki yüzey uyumu ve dağılma etkisi ile teorik ve deneysel farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bu farklılıklara rağmen karbon liflerinin uzunluğu ve oranın artması yoğunluğun artmasına neden olmuştur. Üretim şartlarının bu değerler üzerindeki etkisi gözlenmiştir.

4.2 Karbon Oranı ve Tipinin Çekme Dayanımı Sonuçlarına Etkisi

Karbon fiberin kütlege artan takviyesi kopma kuvveti ve çekme dayanımı değerleri üzerinde artırıcı etkilere sebep olmuştur. Artan oranlar matris içerisindeki yüzey tutunma oranını artırdığından bu artış elde edilmiştir. Kütlege %10 ve %20 oranındaki değişiklikler ile $0,08 \text{ mm}$ ve 3 mm uzunluğundaki fiberlerde aynı oranlarda artış sağlamamış örnek çalışmalara uygun olarak fiber uzunluğunun artması çekme dayanımını artmasına neden olmuştur.

Tablo 4.2. Karbon fiber oranının çekme dayanımına etkisi

Karbon Fiber Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)
0	31,69
10	48,73
20	62,39

Tablo 4.2. örnek bir çalışmayı göstermiştir. Örnek çalışmada ve elde ettiğimiz veriler birbirine çok yakın çıkmıştır. Nedeni örnek çalışmada da fırınlama işlemi yapılmamasıdır (Doğru vd., 2024).

Bir başka çalışmaya bakarak yorumladığımız zaman (Genç, A., 2017), bizim çalışmamızda takviyesiz PA6 çekme dayanımı 30 MPa civarı iken bu değer daha yüksek çıkmasının nedeni üretim yöntemlerindeki şartlardan kaynaklanmaktadır. Üretim öncesi fırınlama PA6 granüllerinin ön ısıtma yapılarak yüksek derece ve ısılarda bekletilmesi örnek çalışma değerlerinde artışa neden olmuştur (Tablo 4.3.).

Çalışmamızdaki kullanılan PA6 granüllerinin fırınlanmadan ölçülen çekme dayanımı 30 MPa, fırınlanmış olarak 60 Mpa katalog değerlerinde yer almıştır. Çalışmamızda elde ettiğimiz çekme testi sonucu ise takviyesiz PA6 için 31,85 Mpa olarak ölçülerek çok yakın bir değer elde edilmiştir. Dolayısı benzer bir çalışmaya da baktığımızda testlerindeki fırınlanmış değerler ile arasındaki farklar çalışmamız için kanıtlayıcı bir çalışma olmuştur (Genç, A., 2017).

Tablo 4.3. Karbon fiber oranının çekme dayanımına etkisi

Karbon Fiber Oranı (%)	Çekme Dayanım (MPa)
0	71,6
10	105
20	143,2
30	168,27

Elde edilen deneysel veriler, karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerin çekme dayanımının, fiberin hacimsel oranı ve tipine bağlı olarak genel bir artış sergilediğini olarak doğrulamaktadır. Ancak, bu deneysel bulguların teorik

modellerle karşılaştırılması, özellikle farklı fiber uzunlukları bağlamında anlamlı sapmaları ortaya koymuştur. Kısa fiber uzunluğuna (0,08 mm) sahip kompozitlerde, deneysel olarak ölçülen çekme dayanımı değerleri, mevcut teorik hesaplamalardan yüksek değer alırken, fiber uzunluğunun 3 mm'ye çıkarılmasıyla teorik değer deneysel ölçümlerden daha yüksek değerler almıştır. Bu durum, üretim süreçlerinde kaçınılmaz olarak ortaya çıkan karbon fiberlerin süreksiz ve dağınık dağılımının, özellikle uzun fiberlerde, kompozit malzemenin makroskopik çekme dayanımının basit analitik formülasyonlarla doğru bir şekilde modellenmesini sınırladığını istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde işaret etmektedir (Callister, 2020). Modifiye edilmiş karışımlar kuralındaki teorik ve deneysel değerlerin uyumsuzluğu ve her zaman kabul görmeyeceği; minimum ve maksimum değerler alabileceği, süreksiz ve dağınık yapıya hükmedilemeyeceği daha önceki çalışmalarda da görülmüştür (Curtis vd., 1978; Estores vd., 2020). Bu sonuçlar heterojen mikro yapının mekanik özellikler üzerindeki karmaşık etkileşimlerini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, modifiye edilmiş karışımlar kuralının üretim yöntemi ve fiber tiplerine göre yeni ampirik bağıntıların geliştirilmesinin gerekliliğini de ortaya koymuştur.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

- Bu çalışmada, enjeksiyonla kalıplama prosesinde kullanılmak üzere PA6 matrisi ve karbon bazlı dolgu malzemelerinin eriyik karıştırma yöntemiyle başarıyla hazırlanabileceği gösterilmiştir. Karıştırma parametrelerinin dikkatli kontrolü sayesinde, karbon dolgu malzemelerinin PA6 matrisi içerisinde başarılı bir şekilde dağılımı sağlanmıştır. Elde edilen bu karışımlarla, enjeksiyon kalıplama için uygun bir ara malzeme oluşturulmuştur.
- Elde edilen bulgular, karbon fiber ilavesinin PA6 matrisli kompozitlerin yoğunluğunu artırdığını net bir şekilde göstermiştir. Hazırlanan PA6/karbon fiber karışımlarında, karbon fiber içeriğindeki artışla doğru orantılı olarak malzemenin toplam yoğunluğunda az da olsa yükseliş saptanmıştır. Bu durumun temelinde, karbon fiberin PA6 polimerine kıyasla daha yüksek bir yoğunluğa sahip olması yatmaktadır. Yoğunluktaki bu küçük artışa rağmen, karbon fiber takviyesinin sağladığı önemli mekanik iyileşmeler, özellikle mukavemet ve rijitlikteki artışlar, birçok teknik uygulama için bu yoğunluk artışını tolere edilebilir kılmaktadır.
- Karbon fiber oranının PA6 matrisli kompozitlerin çekme dayanımı üzerindeki etkisi belirgindir. Çalışmalar karbon fiber miktarındaki artışın genellikle kompozitin çekme dayanımında önemli bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Takviyesiz referans malzemeye (PA6) göre; %20 kısa fiber (0,08mm) takviyeli kompozitlerde çekme dayanımı %60,5 oranında artarken uzun fiber (3mm) takviyeli kompozit numunelerinin çekme dayanımı ise %112,25 oranında artış göstermiştir. Özellikle daha uzun olan karbon fiber içeren kompozitlerin yüksek mukavemet özellikleri, polimer matrisine daha etkin bir şekilde aktarılacak daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip malzemeler elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Ancak, çok yüksek karbon fiber oranlarında işlenebilirlik sorunları veya fiberlerin homojen dağılımında zorluklar yaşanabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, optimum çekme dayanımı için karbon fiber oranının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekmektedir.
- Karbon fiber takviyeli PA6 kompozitlerde fiber tipinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi, fiberlerin matris içindeki dağılımıyla da yakından ilişkilidir.

İdeal durumda, sürekli ve düzenli bir fiber dağılımı, teorik modellerle çekme dayanımının tahmin edilmesini kolaylaştırır. Ancak, gerçek uygulamalarda sıklıkla karşılaşılan düzensiz ve süreksiz fiber dağılımları, bu teorik hesaplamaları karmaşık hale getirmektedir. Çalışmamızda fiberlerin kümelenmesi, bazı fiberlerin kırılması, yönelim farklılıkları ve boyutsal çeşitlilikler gibi faktörler yük aktarım mekanizmalarını etkileyerek beklenen çekme dayanımından sapmalara neden olmuştur.

5.2 Öneriler

- Gelecek çalışmalarda, farklı tür ve oranlardaki karbon dolgu malzemelerinin (örneğin, farklı boyutlarda karbon nanotüpler veya grafen nanoplateletler) PA6 matrisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenebilir. Ayrıca, karıştırma prosesine yüzey aktif maddeler veya uyumlaştırıcı ajanlar eklenerek karbonun matrisle olan etkileşimi ve nihai ürün özelliklerindeki iyileşmeler araştırılabilir. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin detaylı karakterizasyonu, farklı uygulamalar için potansiyellerini ortaya koyacaktır. Son olarak, enjeksiyon kalıplama parametrelerinin son ürünün performansı üzerindeki etkileri de sistematik olarak incelenmelidir.
- İlerleyen araştırmalarda, karbon fiberin yoğunluk üzerindeki etkisini azaltmaya yönelik farklı yaklaşımlar değerlendirilebilir. Örneğin, daha düşük yoğunluklu alternatif karbon bazlı nanomalzemeler veya diğer hafif dolgu maddeleriyle oluşturulacak karma kompozit sistemleri incelenebilir. Ek olarak, kompozit malzemelerde gözenekli yapılar oluşturma veya köpükleştirme gibi tekniklerle yoğunluk düşürme olanakları araştırılmalıdır. Uygulamanın gerektirdiği özellikler dikkate alınarak, yoğunluk artışının nihai ürün performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmeli ve hafiflik öncelikli uygulamalar için farklı takviye seçenekleri veya üretim metotları göz önünde bulundurulmalıdır. Karbon fiberin yoğunluk üzerindeki bu etkisi dikkate alınarak, malzeme seçimi ve mühendislik tasarım süreçlerinde optimizasyon çalışmalarına önem verilmesi önerilmektedir.
- İlerleyen zamanlarda farklı karbon fiber oranlarının PA6 kompozitlerin çekme dayanımı üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleyen detaylı deneysel çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmalar, farklı fiber uzunlukları,

yüzey işlemleri ve karıştırma teknikleri gibi parametrelerin etkilerini de kapsamalıdır. Ayrıca, deneysel sonuçları destekleyecek ve optimum fiber oranını tahmin etmeye yardımcı olacak teorik modellemeler geliştirilebilir. Uygulama alanına yönelik olarak, maliyet-performans analizleri yapılarak en uygun karbon fiber oranı belirlenmelidir. Üretilen kompozitlerin sadece çekme dayanımı değil, aynı zamanda diğer mekanik özelliklerinin (eğilme dayanımı, darbe dayanımı vb.) de karbon fiber oranına bağlı olarak nasıl değiştiği kapsamlı bir şekilde incelenmelidir.

- Gelecekteki araştırmalar, düzensiz ve süreksiz karbon fiber dağılımının PA6 kompozitlerin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini teorik ve deneysel olarak daha derinlemesine incelemelidir. Fiberlerin dağılımını karakterize etmek için gelişmiş görüntüleme teknikleri kullanılabilir ve bu dağılım özelliklerini dikkate alan farklı modelleme yaklaşımları geliştirilebilir. Ayrıca, üretim süreçlerinin fiber dağılımı üzerindeki etkileri araştırılarak daha homojen dağılımlar elde etme yöntemleri üzerinde çalışılmalıdır. Deneysel çalışmalar, farklı dağılım özelliklerine sahip kompozitlerin çekme dayanımlarını karşılaştırarak teorik modellerin geçerliliğini test etmelidir. Uygulama açısından, güvenilir tasarımlar için deneysel verilerin önemi vurgulanmalı ve teorik tahminlerin sınırlılıkları göz önünde bulundurulmalıdır.
- Üretimde daha homojen bir yapı olması bakımından üretimin çift vidalı ekstruder ile karıştırılması sağlanmalı ve PA6 malzemesinde nem alma için fırınlama işlemleri de yapılarak imalatı gerçekleştirilmelidir. Bu sayede mekanik özelliklerindeki iyileşmelerde artışlar daha düzenli ve belirgin hale getirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, N., Abdan, K., Roslim, M. H. M., Radzuan, M. N., Shafi, A. R., & Hao, L. C. (2024). Properties of kenaf fiber-reinforced polyamide 6 composites. *e-Polymers*, 24(1), 20228112. doi.org/10.1515/epoly-2022-8112
- Ahmadian, H., Yang, M., Nagarajan, A., & Soghrati, S. (2019). Effects of shape and misalignment of fibers on the failure response of carbon fiber reinforced polymers. *Computational Mechanics*, 63, 999-1017. https://doi.org/10.1007/s00466-018-1634-1
- Altınsoy, İ. (2009). Alümina Takviyeli Bakır Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Arfen BRB Web Sitesi, (2025). Karbon fiberin mekanik ve fiziksel özellikleri. https://arfenbrb.com/karbon-fiber-guclendirme-sistemleri adresinden 15 Mayıs 2025 tarihine alınmıştır.
- Beşergil, B., (2025). Polimer Matris Kompozitler; Üretim Prosesleri. https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_96.html adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Callister's materials science and engineering. John Wiley & Sons.
- Curtis, P. T., Bader, M. G., & Bailey, J. E. (1978). The stiffness and strength of a polyamide thermoplastic reinforced with glass and carbon fibres. *Journal of Materials Science*, 13, 377-390. https://doi.org/10.1007/BF00647783
- Doğru, A., Seydibeyoğlu, M. (2024). The effect of printing parameters on the mechanical properties of fiber-reinforced PA6 matrix composites in material extrusion-based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. https://doi.org/10.1108/rpj-03-2024-0119.
- Dong, W., Yu, Z., Sun, X., Hu, Z., E, S., Tong, F., Wang, S., & Li, X. (2025). Carbon Fiber-Reinforced Polyamide 6 Composites: Impact of Fiber Type and Concentration on the Mechanical Properties. *Materials* (Basel, Switzerland), 18(7), 1413. https://doi.org/10.3390/ma18071413
- Ekin Makine Web Sitesi, 2025. Enjeksiyon Makinesi özellikleri. https://ekinmakina.com/urunler/160-orion/ adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Estores, G. B., Lejano, B. A. (2020). Micromechanical modeling of tensile strength of short random carbon fiber reinforced concrete. *GEOMATE Journal*, 18(65), 185-191.
- García-Collado, A., Blanco, J. M., Gupta, M. K., & Dorado-Vicente, R. (2022). Advances in polymers based Multi-Material Additive-Manufacturing Techniques: State-of-art review on properties and applications. *Additive Manufacturing*, 50, 102577. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102577
- Genç, A. (2017). Investigation of Mechanical Properties of Carbon Fiber Filled Polyamide 6 Polymers. In *International Advanced Researches & Engineering Congress 2017 Proceeding Book* (p. 304). Dr. R. HALICIOGLU.svb
- Ghirmatsion, H. (2024). Mechanical Reinforcement of Building Materials with Microfibers Produced by Electrospinning [Yüksek Lisans Tezi]. Oslo Metropolitan Üniversitesi.
- Ghossein, H. K. (2019). Novel wet laid nonwoven carbon fiber mats and their composites. [Doktora tezi]. Tennessee Üniversitesi.

- Gomez, J., Villaro, E., Karagiannidis, P. G., & Elmarakbi, A. (2020). Effects of chemical structure and morphology of graphene-related materials (GRMs) on melt processing and properties of GRM/polyamide-6 nanocomposites. *Results in Materials*, 7, 100105. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100105>
- Ichakpa, M., Goodyear, M., Duthie, J., Duthie, M., Wisely, R., MacPherson, A., ... & Njuguna, J. (2023). Investigation on mechanical and thermal properties of 3D-printed polyamide 6, graphene oxide and glass-fibre-reinforced composites under dry, wet and high temperature conditions. *Journal of Composites Science*, 7(6), 227. <https://doi.org/10.3390/jcs7060227>
- Irisawa, T., Inagaki, R., Iida, J., Iwamura, R., Ujihara, K., Kobayashi, S., & Tanabe, Y. (2018). The influence of oxygen containing functional groups on carbon fibers for mechanical properties and recyclability of CFRTs made with in-situ polymerizable polyamide 6. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.035>
- Karlı, NG, Özkan, C., Aytac, A. ve Deniz, V. (2013). Boyutlandırma malzemelerinin karbon fiber takviyeli poliamid 6, 6 kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkileri. *Polimer Kompozitler*, 34 (10), 1583-1590. <https://doi.org/10.1002/pc.22556>
- Kumar, S., Kanagaraj, G. (2016). Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347 - 4357. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2126-2>.
- Krenchel, H. (1964). *Fibre reinforcement*, akademisk forlag, copenhagen. Google Scholar, 7-22.
- Liang, J., Xu, Y., Wei, Z., Song, P., Chen, G., & Zhang, W. (2013). Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115, 209-218. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3184-2>.
- Mindivan, F. (2018). Poliamid 6/grafen nanotabakali (PA6/GNP) kompozitlerin termo-mekanik özelliklerinin karakterizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 443-450. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.368631>
- Mohammadkhani, Pouya (2023) Anisotropic mechanical material investigation on moisture and strain rate sensitivity of direct compounded compression moulded Glass/PA6 LFTs. doi: <https://core.ac.uk/download/603971045.pdf>
- NCB Plastik Web Sitesi, 2025. PA6 özellikleri. <https://www.ncbplastik.com/sayfalar.asp?LanguageID=1&cid=3&id=8> adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Palola, S., Laurikainen, P., García-Arrieta, S., Goikuria Astorkia, E., & Sarlin, E. (2022). Towards sustainable composite manufacturing with recycled carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, 14(6), 1098. <https://doi.org/10.3390/polym14061098>
- Sun, B., Mubarak, S., Zhang, G., Peng, K., Hu, X., Zhang, Q., Wu, L., & Wang, J. (2023). Fused-Deposition Modeling 3D Printing of Short-Cut Carbon-Fiber-Reinforced PA6 Composites for Strengthening, Toughening, and Light Weighting. *Polymers*, 15. <https://doi.org/10.3390/polym15183722>.
- Taylor, L., Dewey, O., Headrick, R., Komatsu, N., Peraca, N., Wehmeyer, G., Kono, J., & Pasquali, M. (2021). Improved properties, increased production, and the path to broad adoption of carbon nanotube fibers. *Carbon*, 171, 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.07.058>.
- Toray Grup Web Sitesi, 2025. T300 karbon fiber özellikleri. <https://toray-cfe.com/wp-content/uploads/2025/02/Torayca-T300-Technical-Data-Sheet.pdf> adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

Sigrafil Web Sitesi, 2025. T300 karbon fiber özellikleri. <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigrafil-short-carbon-fibers/> adresinden 15 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.

Yetgin, S. H., Kuş, G., Koyunbakan, M., Yıldırım, F., Eskizeybek, V., & Genç, A. (2020). Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(2), 543-551. <https://doi.org/10.24012/dumf.513021>

Zhang, Z (2023). The effects of moisture conditioning on the mechanical properties of the fused deposition modeling (FDM) printed carbon fiber reinforced composites. doi: <https://core.ac.uk/download/565916415.pdf>

