



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ATIK POLİAMİD KATKILI POLİMER
MATRİS KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ VE
MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Müfit Samet ARPINAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

04-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Müfit Samet ARPINAR tarafından hazırlanan “Atık Poliamid Katkılı Polimer Matris Kompozit Geliştirilmesi ve Mekanik Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 10/04/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Emin SALUR
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Okan DEMİR
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Müfit Samet ARPINAR

Tarih:10.04.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK POLİAMİD KATKILI POLİMER MATRİS KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

MÜFİT SAMET ARPINAR

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2025, 81 Sayfa

Jüri
Prof.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Doç. Dr. Emin SALUR
Dr. Öğr. Üyesi Okan DEMİR

Bu çalışmada, fabrika atığı olan poliamid ipliklerin katkısıyla çevre dostu ve ekonomik açıdan avantajlı yeni bir polimer matris kompoziti geliştirilmiş ve bu kompozitin mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın ana hedefi, atık malzemelerin değerlendirilmesi yoluyla sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği sağlarken üstün performanslı malzemeler üretmektir.

Reçine kompozitinin mekanik performansını belirlemek için çekme testi, üç noktadan eğilme testi ve sıyrılma testi gibi temel mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler, eğilmede mukavemet, eğilmede elastiklik modülü, birim şekil değiştirme ve gerilme performansı gibi kritik parametreleri değerlendirmek için yapılmıştır.

Çalışmada, farklı boyutlardaki poliamid ipliklerin kompozit malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizler, deneysel parametrelerin malzemenin mekanik performansı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Sonuçlar, atık poliamid katkısının polimer matris kompozitin mekanik özelliklerine anlamlı katkılar sağladığını ve optimize edilmiş formülasyonların endüstriyel uygulamalar için güçlü adaylar olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Poliamid, Mekanik Karakterizasyon

MS THESIS

DEVELOPMENT AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A WASTE POLYAMIDE-REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE

Müfit Samet ARPINAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2025, 81 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assoc.Prof.Dr. Emin SALUR
Asst.Prof.Dr.Okan DEMİR**

ABSTRACT

In this study, a novel, eco-friendly, and cost-effective polymer matrix composite was developed by incorporating waste polyamide yarns derived from industrial processes. The mechanical properties of this composite were comprehensively investigated. The primary objective of the research is to promote sustainability and cost efficiency through the utilization of waste materials while producing high-performance materials.

To evaluate the mechanical performance of the resin composite, fundamental mechanical tests such as tensile testing, three-point bending tests, and delamination (interfacial) testing were conducted. These tests were performed to assess critical parameters including flexural strength, flexural modulus, strain at break, and stress performance.

The study also examined the effects of polyamide yarns with varying dimensions on the composite material. The analyses revealed detailed insights into how experimental parameters influence the mechanical behavior of the material. The results demonstrated that the incorporation of waste polyamide significantly enhances the mechanical properties of the polymer matrix composite and that optimized formulations hold strong potential for industrial applications.

Keywords: Polyamide, Mechanical Characterization

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana yol gösterici olan, bilgi, birikim ve tecrübelerini paylaşan tez danışman hocam Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e teşekkür ederim. Ayrıca hayatımın her anında yanımda olan ve destekleyen eşim Arş. Gör. Aslı ARPINAR'a ve sevgili aileme gönülden teşekkürler.

Müfit Samet ARPINAR
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Kompozit Malzemeler.....	1
1.2.Polimerler.....	4
1.2.1.Polimerin Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	4
1.3. Lifler.....	6
1.3.1. Lif Çeşitleri	6
1.3.1.1. Doğal Lifler.....	6
1.3.1.2. Hayvansal Lifler.....	6
1.3.1.3. Bitkisel lifler	7
1.3.1.4. Madensel Lifler	7
1.3.1.5. Sentetik Lifler	7
1.4. Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi	10
1.4.1.Lif Geometrisinin Etkisi.....	10
1.4.2.Lif Boyunun Etkisi.....	11
2.İSTATİKSEL DEĞERLENDİRME VE OPTİMİZASYONU	14
2.1. Veri Setinin Tanımlanması ve Ön İşleme	14
2.2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri.....	14
2.3. Optimizasyon Yöntemleri	14
2.4. Determinasyon Katsayısı (R^2).....	15
3.KAYNAK ARAŞTIRMASI	16

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	20
4.1.1. Poliamid 6 (PA6)	20
4.1.2. Reçine.....	21
4.2. Yapılan Deneyler ve Hesaplamalar.....	22
4.2.1. Sıyırılma Testi	22
4.2.2. Kritik Fiber Hacim Oranı Hesabı.....	29
4.2.3. Çekme Testi	31
4.2.4. Üç Noktadan Eğilme Testi.....	31
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	33
5.1. Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçları.....	33
5.2. Çekme Testi Sonuçları	48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
6.1 Sonuçlar	64
6.2 Öneriler	65
6.2.1. Endüstriyel Uygulamalar İçin Öneriler.....	65
6.2.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler.....	66
6.2.3. Optimizasyon Çalışmalarına Yönelik Öneriler.....	67
6.3. Genel Değerlendirme	67
KAYNAKLAR	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Elastiklik modülü
R^2	Determinasyon katsayısı
X	Bağımsız değişken
Y	Yanıt
τ	Kayma gerilmesi
σ	Normal gerilme
ε	Hata terimi
β	Katsayılar
V_{fmin}	Minimum fiber oranı
V_{fcr}	Kritik fiber oranı
σ_m	Matris normal gerilme değeri
σ_f	Fiber normal gerilme değeri
E_f	Fiber elastiklik modülü
E_m	Matris elastiklik modülü

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
b	: Test kirişi genişliği (mm)
d	: Test kirişi derinliği (mm)
F	: Kuvvet (N)
KFTP	: Karbon fiber takviyeli polimer
KETP	: Karbon elyaf takviyeli plastik
PA	: Poliamid
PPA	: Polipitilamit
RSM	: Yanıt yüzey yöntemi
YYY	: Yanıt yüzey yöntemi

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiadaki ilerlemeler, insanların ihtiyaçlarına daha iyi yanıt için sürekli yeni malzemelerin keşfedilmesine olanak tanıyor. Savunma, havacılık, mikroelektronik, iletişim ve otomotiv gibi yenilikçi sektörlerin talepleri doğrultusunda çeşitli yeni malzemeler geliştiriliyor. Malzeme bilimi, bu ihtiyaçları karşılamak amacıyla çok disiplinli ve üretim odaklı bir alan haline gelmiş durumda. Son 50 yılın en dikkat çeken malzemelerinden biri olan polimer kompozitler de bu alanın önemli bir parçası olarak pek çok araştırmaya konu olmuş ve olmaya devam ediyor. Günümüzde hava, kara ve deniz taşıtlarının birçok parçasında, tıpta, elektrik-elektronik sektöründe, inşaat, boyada ve hatta gıda sanayinde yaygın bir şekilde kullanılan polimer kompozitler, günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline geldi. Özellikle son dönemlerde uzay, otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi hızla büyüyen endüstrilerde hafif ama yüksek performanslı malzemelere duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte, polimer esaslı kompozitlere yönelik araştırmalar da hız kazandı.

Farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler, son yıllarda benzersiz özellikleriyle büyük ilgi görüyor. Polimerik reçine ve liflerin bir araya getirilmesiyle üretilen cam elyaf, karbon elyaf ve bazalt elyaf gibi kompozitler bu alandaki en yaygın örnekler arasında yer almakta. Elyaf takviyeli bu kompozitler, yüksek mukavemetleri, hafif yapıları, dayanıklılıkları, çevresel ve aşındırıcı etkilere karşı dirençleri, tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı gibi avantajlarıyla havacılık ve otomotiv gibi birçok mühendislik alanında oldukça yaygın kullanılıyor. Özellikle elyaf takviyeli plastikler, yüksek mukavemetleri, iyi sönümlenebilirlik özellikleri, sertlikleri ve hafiflikleri sayesinde otomotiv sektöründe giderek daha fazla tercih edilmekte. Ayrıca, geri dönüştürülebilir olmaları, seri üretime uygun olmaları, hızlı işlenebilirlikleri ve metal yapılarla kolayca entegre edilebilmeleri, otomotiv sanayisinde termoplastik elyaf takviyeli plastiklerin kullanımını daha cazip hale getiriyor.

1.1.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşan heterojen sistemlerdir. Bu malzemelerin mikro yapısı incelendiğinde, bileşenleri oluşturan fazların belirgin bir şekilde ayırt edilebildiği görülmektedir. Kompozit sistemlerde temel faz, matris olarak adlandırılırken, mekanik

dayanımı artıran ve yapısal bütünlüğü sağlayan bileşen ise takviye malzemesi olarak tanımlanmaktadır.

Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin farklı özellikleri, birleşerek yeni bir malzemenin yapısında bir araya gelir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin sahip olduğu benzersiz özelliklerin tek bir malzemede bulunması mümkün değildir. (Koruvatan, 2008).

Kompozit malzemelerin tercih edilmesinin başlıca sebebi, düşük ağırlıklarına rağmen yüksek mukavemet sunmaları, kimyasal ve korozyona karşı direnç göstermeleri ve üstün termal performans özelliklerine sahip olmalarıdır. (Erkal, 2015).

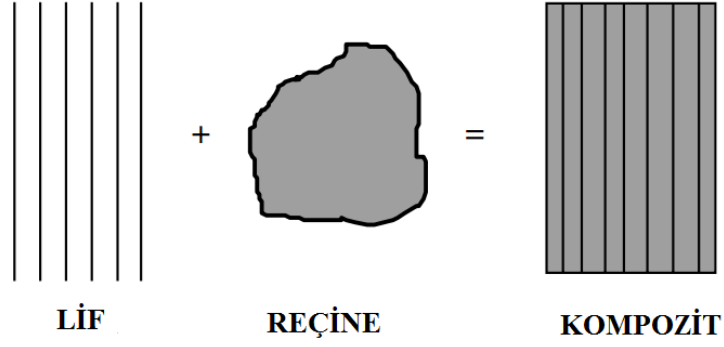
Termoplastikler arasında poliamidler, yüksek tokluk, darbe ve aşınma direnci, düşük maliyet, darbe hasar toleransı ve kullanım kolaylığı gibi avantajları nedeniyle hem kompozit konfigürasyonlarda hem de otomotiv endüstrisinde önemli bir ilgi odağı olmuştur.

Matris malzemesi

Matris malzemesi, uygulanan yükü takviye malzemesine ileterek yapının bütünlüğünü sağlar, formunu belirler ve sertlik kazandırır. Ayrıca, olası mekanik hasarlara karşı takviye malzemesini koruyucu bir görev üstlenir. Matris malzemesinin türü, süneklik, darbe dayanımı gibi mekanik performans özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Mazumdar, 2002).

Takviye malzemesi

Kompozit malzemelerde uygulanan yükün %70-90'ı takviye malzemesi tarafından karşılanmakta olup, rijitlik, mukavemet, termal kararlılık ve diğer yapısal özelliklerin iyileştirilmesine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Takviye malzemesinin türüne bağlı olarak, elektriksel iletkenlik veya yalıtım özellikleri kazandırılabilir (Mazumdar, 2002). Kompozit malzemelerin matris ve takviye bileşenlerinin şematik gösterimi Şekil 1.1'de sunulmuştur. Takviye malzemeleri, lif, partikül veya sürekli lif formunda olabilirken, matris malzemeleri ise metal, polimer veya seramik esaslı olarak seçilebilmektedir (Mazumdar, 2002).



Şekil 1.1.Kompozit malzemelerin yapısı (Mazumdar, 2002)

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde kullanılan matris malzemeleri;

- Metal,
- Seramik,
- Polimerlerdir.

Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, en yaygın kullanılan kompozit malzeme türleri arasında yer almakta olup, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Düşük maliyetleri, kolay temin edilebilmeleri, hafiflikleri ve üretim süreçlerindeki pratiklikleri sayesinde, metal ve seramik bazlı malzemelere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadırlar. Polimer matrisli kompozitlerde matris fazı, korozyon direncini artırmanın yanı sıra, uygulanan yükü dağıtarak yapısal bütünlüğü sağlamaktadır. Takviye fazı ise kompozitin mukavemet ve rijitlik özelliklerini iyileştiren temel bileşendir.

Bu tür kompozitlerin üretimi, metal ve seramik esaslı malzemelere göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmekte olup, bu durum üretim süreçlerini daha verimli hale getirmektedir (Çelikçi, 2013). Polimer matrisli kompozitler, düşük yoğunlukları, kolay şekillendirilebilmeleri ve elektriksel yalıtkanlık özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Takviye malzemesi olarak genellikle karbon, cam ve bor lifleri kullanılırken, matris malzemesi olarak termoset ve termoplastik polimerler tercih edilmektedir. Bununla birlikte, polimer bazlı kompozitlerin düşük termal dayanımları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı sınırlıdır (Yıldırım, 2016).

1.2.Polimerler

Polimerler, birçok küçük molekülün (monomerlerin) kimyasal bağlarla birleşerek uzun zincirler oluşturduğu büyük moleküllerdir. Doğal ve sentetik olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadırlar. Doğal polimerlere örnek olarak proteinler, selüloz ve DNA verilebilirken, sentetik polimerler arasında plastikler, polyesterler ve naylon gibi malzemeler yer alır.

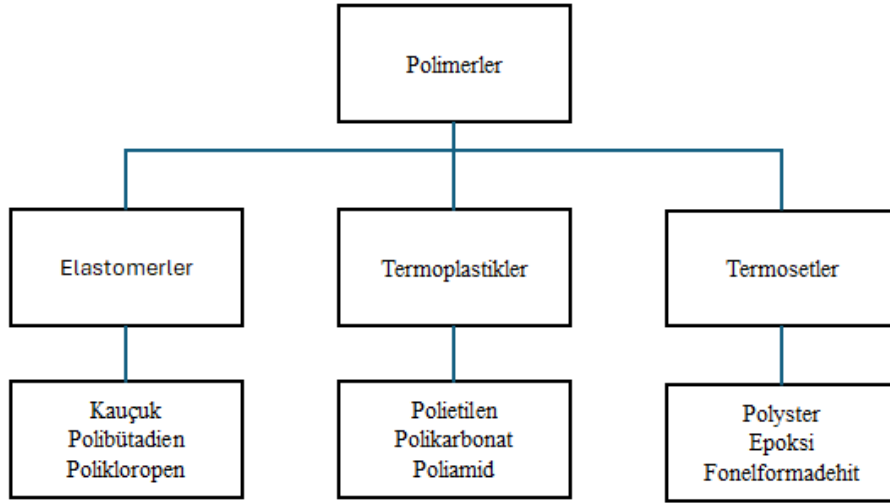
Polimerlerin yapısı, özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Düz zincirli, dallanmış veya çapraz bağlı yapılar polimerin esneklik, dayanıklılık ve erime noktası gibi özelliklerini belirler. Isıya duyarlılıklarına göre de iki ana kategoriye ayrılırlar:

- Termoplastik Polimerler: Isıtıldığında eriyip soğutulduğunda tekrar sertleşir, bu da yeniden şekillendirilmelerine olanak tanır (örneğin polietilen, polipropilen).
- Termoset Polimerler: Sertleştikten sonra tekrar eritilemezler, dayanıklı ve ısıya dirençli yapıya sahiptirler (örneğin epoksi reçineleri, poliüretan).

Günümüzde polimerler, ambalaj malzemelerinden tekstil ürünlerine, otomotiv parçalarından tıbbi cihazlara kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır. Hafiflik, dayanıklılık, korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde birçok endüstride tercih edilmektedirler.

1.2.1.Polimerin Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Polimerler, fiziksel özelliklerine bağlı olarak en yaygın sınıflandırmada termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, Şekil 1.2'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Polimerlerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılması (Doğu, 2020)

Termoplastikler

Termoplastikler, günlük hayatta en yaygın kullanılan polimer türlerinden biridir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Poliamid, poliyeten tereftalat, polikarbonat, poliyeten, polipropilen ve akrilonitril bütadien stiren, en bilinen termoplastik malzemeler arasında yer almaktadır (Kocabaş, 2014).

Termosetler

Isı ve/veya kimyasal bir reaksiyonla sertleşen ve bir kez sertleştirildikten sonra yeniden şekillendirilemeyen plastik malzemelerdir. Bu malzemeler, polimerleşme süreci sırasında çapraz bağlar (kovalent bağlar) oluşur, bu da onların sert, dayanıklı ve ısıya karşı dirençli olmasına yol açar. Termosetler, ısındıklarında erimezler veya yumuşamazlar, bu nedenle şekilleri kalıcıdır.

Elastomerler

Elastik özelliklere sahip polimer malzemelerdir; yani, deforme olduktan sonra eski şekillerine geri dönebilirler. Bu malzemeler, düşük sıcaklıklarda bile esneklik gösterir ve genellikle yüksek gerilme ve gerilme altında bile şekillerini koruyabilirler. Elastomerler, kauçuklar gibi yüksek esneklik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

1.3. Lifler

Lifler, bir boyutu diğer boyutlarına kıyasla oldukça büyük olan, doğal kaynaklı veya sentetik olarak üretilen, aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok daha yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Ekincioğlu, 2003).

Liflerin büyük formasyondaki halleriyle karşılaştırıldığında, elastisite modülleri ve mekanik dayanımları oldukça yüksek olup, bu özellikleri onları malzemenin en gelişmiş hali haline getirmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan liflerin yanı sıra, insanlık tarih boyunca farklı lif türlerinden yararlanmıştır. Eski dönemlerde, kerpiç ve alçı gibi yapı malzemelerinde keten, kenevir, at kuyruğu ve keçi kılı gibi doğal liflerin takviye amacıyla kullanıldığı bilinmektedir.

1.3.1. Lif Çeşitleri

Lifler, kullanım alanlarına ve sahip oldukları farklı mekanik özelliklere bağlı olarak çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Genel sınıflandırmaya göre lifler; doğal lifler, hayvansal lifler, bitkisel lifler, mineral lifler, sentetik lifler, polimer lifler, metalik lifler ve seramik lifler olmak üzere farklı gruplarda incelenmektedir (Bunsell, 1988).

1.3.1.1. Doğal Lifler

Bu liflerin en belirgin özelliklerinden biri, kolayca temin edilebilmeleridir. Tarihsel olarak bilinen en eski doğal lifler arasında saman ve at yelesi yer almaktadır. Portland çimentosunda kullanılan diğer doğal lifler ise bambu, Hindistan cevizi, şeker kamışı ve ahşap gibi malzemelerden elde edilen liflerdir (Ekincioğlu, 2003).

1.3.1.2. Hayvansal Lifler

Hayvansal lifler, hayvanların kürk, tüy, kıl ve yün gibi doğal malzemelerinden elde edilir.

1.3.1.3. Bitkisel lifler

Bitkisel lifler, sağlık ve bakım açısından kolaylık sağlayan özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan doğal lifler arasında yer almaktadır. Bu özellikleri, onları pek çok farklı uygulama alanında tercih edilen bir malzeme yapmaktadır.

1.3.1.4. Madensel Lifler

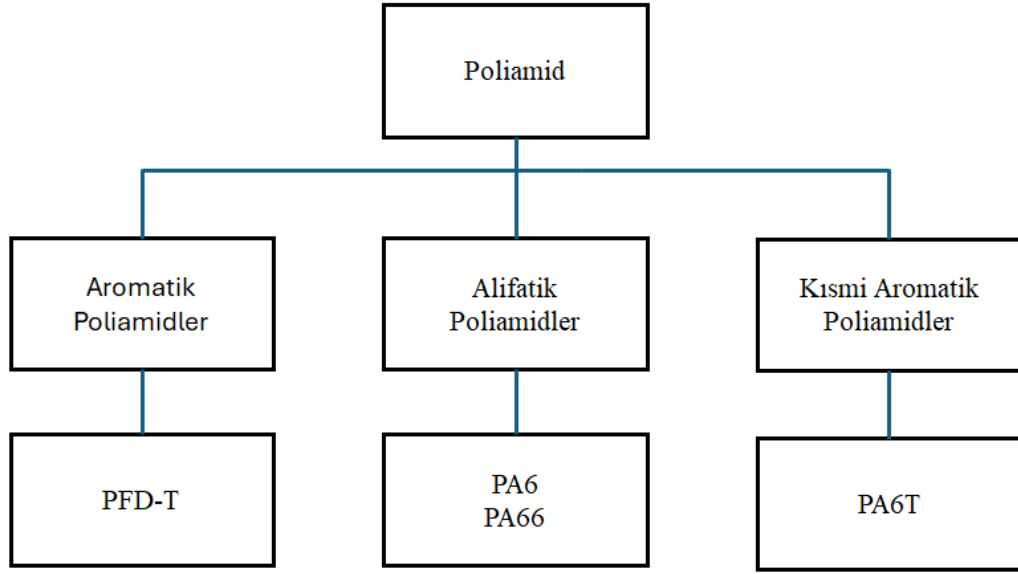
Madensel lifler, organik olmayan maddelerden üretilen ve ince tel formuna getirilebilen liflerdir. Bu lifler, çeşitli kimyasal işlemlerle işlenerek elde edilir. Madensel liflerin en yaygın örnekleri arasında kaya lifleri, metalik lifler ve cam lifleri bulunmaktadır. Bu lifler, özellikle dayanıklılık ve ısıya karşı direnç gibi özellikleriyle dikkat çeker.

1.3.1.5. Sentetik Lifler

Sentetik lifler, petrokimya ve tekstil endüstrisindeki ilerlemeler ve araştırmalar sonucunda üretilen, tamamen insan yapımı olan malzemelerdir. Bu lifler, çeşitli kimyasal süreçlerle üretilir ve farklı özellikler sunar. Başlıca polimer esaslı sentetik lifler arasında akrilik, naylon, polyester, polietilen, polipropilen ve poliamid 6.6 (PA 6.6) öne çıkan türlerdir. Bu lifler, dayanıklılık, esneklik ve çeşitli çevresel koşullara karşı direnç gibi avantajlar sağlar.

1.3.1.6 Poliamid

Yarı kristalin bir yapı sergileyen poliamid, 1930'ların ortalarında keşfedilmiş olup, Amerikan DuPont şirketi tarafından 1939 yılında ticarileştirilmiştir. Bu şirket tarafından geliştirilen ve ticari adı naylon olan poliamid, ilk mühendislik plastiği olarak kabul edilir. Poliamid türleri şekil 1.3.'de gösterilmiştir. Poliamid, mühendislik plastikleri arasında yer alır ve halk arasında naylon olarak da bilinir. Poliamid, yüksek mekanik, termal ve kimyasal dayanım gibi üstün özellikleri sayesinde, kısa bir süre içinde yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle poliamid 6 ve poliamid 6.6 konvansiyonel poliamid türleri olarak bilinir ve bu tür uygulamalarda en çok tercih edilen polimerler arasında yer alır. Şekil 1.3'te poliamid çeşitlerinin şeması sunulmuştur.

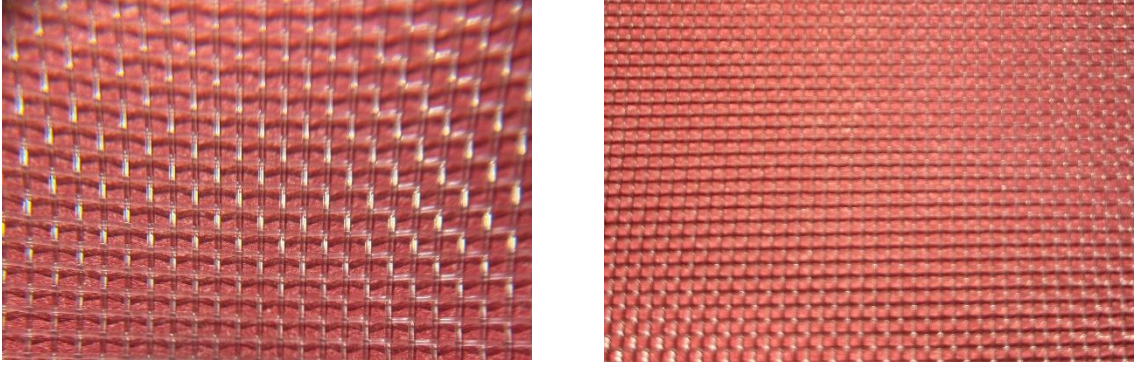


Şekil 1.3. Poliamid türleri

Farklı monomerlerin kullanımıyla üretilen poliamidler, çeşitlerine göre farklı karakteristik özellikler gösterebilir. Poliamidlerin özellikleri, türlerine bağlı olarak oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Genel olarak alkol (örneğin metanol), aromatik hidrokarbonlar, esterler ve ketonlara karşı dirençli oldukları bilinmektedir.

Poliamid lifleri, sert plastiklerdir ve aşınma ile bükülmeye karşı yüksek dayanıklılık gösterir. Yük altında dayanım kapasitesi yüksektir. Poliamid, kalıplama, ekstrüzyon, çözelti, kaplama ve döküm yöntemleriyle üretilir. Mekanik özellikleri açısından faydalı özelliklere sahip olup, dişli çarklar, kamlar, kaymalı yataklar, rulman yalak kafesleri ve kızaklar gibi elemanların üretiminde kullanılır. Ayrıca, bu parçaların yağlanması gerek yoktur. Poliamid, takım tezgâhlarında aşınmaya karşı koruyucu kaplama olarak da kullanılır.

Poliamid malzemeleri, yüksek yorulma mukavemeti, iyi sürtünme direnci, düşük sürtünme katsayısı ve üstün darbe dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, kimyasal direncinin yanı sıra iyi elektriksel özelliklere de sahiptir. Poliamid, kaynak edilebilir ve yapıştırılabilir bir malzemedir. Sert yüzeyi ve çizilmelere karşı dayanıklılığı ile bilinir. Nem alma ve sonrasında dışarıya verme özelliği nedeniyle iyi mekanik özellikler gösterir. Döküm yöntemiyle de üretilen bu sentetik termoplastik, naylon türleri içinde mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en iyi olanıdır. Düşük ve normal kayma hızlarında, toz, kum gibi aşındırıcı ortamlarda çalışma ömrü, döküm, demir, bronz ve çelikten 2-10 kat daha uzun olabilmektedir (Ekincioglu, 2003).



Şekil 1.4. Poliamid 6,6

Poliamid 6,6

Poliamid 6-6 (PA6-6) veya Nylon 6-6 en popüler mühendislik termoplastiklerinden biridir. Şekil 1.4'te verilen görseller Sefar firmasına ait olup tezimde fabrikanın atığı olarak kullandığımız poliamiddir. Çeşitli uygulamalarda çoğunlukla metal yerine kullanılır. Nylon 66, heksametilendiamin ve adipik asidin polikondenzasyonu ile sentezlenir. Bu iki monomerin her biri 6 karbon atomu içerir. Poliamid 6,6'nın erime noktası 265°C'dir.

PA 6,6, termoplastik bir malzeme olup kristal yapıya sahiptir ve katkı maddeleri ile yumuşatıcılar eklenerek çok çeşitli plastik formlarında üretilebilir. Nylon ailesi içinde en yüksek erime sıcaklığına sahip olan bu poliamid, yüksek kuvvet ve sertliğe sahip olup sıcaklık arttıkça sertliğini koruma yeteneğine sahiptir. PA 6,6, PA 6'ya kıyasla daha yüksek bir erime sıcaklığına sahiptir (265 °C, PA 6'nın erime sıcaklığı ise 220 °C'dir).

Bu malzeme, su alıp şişleme eğilimi göstermediği için PA 6'ya benzer şekilde nemin etkisiyle yapısal değişiklikler yaşamaz. PA 6,6, kristal yapıya sahip olup, erime sıcaklığı (T_e) 265°C, cam geçiş sıcaklığı (T_g) ise 53°C'dir. 150°C'ye kadar stabil bir şekilde kullanılabilir ve darbe direnci geniş bir sıcaklık aralığında yüksektir. PA 6,6, alkalilere karşı dayanıklıdır, ancak anorganik asitlerden etkilenebilir.

PA 6,6 (Poliamid 6,6), yüksek sertlik, tokluk ve yorulmaya karşı mukavemeti ile dikkat çeker. Aynı zamanda sünme mukavemetine sahip olup, alev geciktirici özellikleri sayesinde güvenli kullanım sunar. Elektriksel yalıtım kabiliyeti ve kimyasal mukavemeti, bu malzemenin endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. PA 6,6'nın aşınma mukavemeti ve düşük sürtünme katsayısı, özellikle hareketli parçaların kullanım ömrünü uzatır. Dış koşullara karşı dayanıklı olması, uzun süreli kullanımda malzemenin performansını korur. Ayrıca, geniş renk yelpazesi ve işleme kolaylığı, estetik ve üretim esnekliği sunarak farklı sektörlerde kullanılmasını mümkün kılar.

Son yıllarda, birçok radyatör uç deposu, pirinçten kalıplanmış cam elyaf takviyeli PA 6,6 ile değiştirilmiştir. Cam elyafı PA 6,6, giriş manifoldu ve yakıt hatlarında da hızlı gelişmeler göstermektedir. Minerale takviyeli PA 6,6, kalıplanmış çamurluk uzantılarında, ayna muhafazalarında, kaporta havalandırma menfezi ızgaralarında, jant kapaklarında, plaka ceplerinde ve yakıt dolum kapaklarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu malzeme, boya fırın sıcaklıklarına dayanıklılığı, iyi boyut kararlılığı ve son kullanım ortamına karşı gösterdiği dayanım sayesinde tercih edilmektedir.

Kaporta altı parçalar, -40°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesi ve çok çeşitli koşullarda, yüksek çalışma sıcaklıklarına, sıcaklık farklılıklarına, olası darbelere, yağ, yakıt, yağlayıcılar ve glikol soğutucuları gibi otomotiv sıvılarına, titreşim ve yorulmaya dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, bu parçaların şekillerini muhafaza etmeleri gerekmektedir.

Cam elyaf takviyeli PA 6,6, radyatör uç depo kapakları ve termostat kutularında yaygın olarak kullanılır. Bu malzeme, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında zararlı soğutucu solüsyonlara karşı dayanıklıdır. PA 6,6 ise, emniyet kemeri bileşenleri, trim bağlama elemanları, bağlayıcı elemanlar, lensler ve siviçler gibi otomotiv parçalarında kullanılmaktadır.

Teflon ve cam elyaf ile takviye edilen bazı PA 6,6 sınıfları, vitesler, avaralar, makaralar, rulmanlar, aşınma bantları ve yatak yuvaları gibi bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tür malzemeler, düşük sürtünme, bükülme yorulmasına karşı direnç ve boyut kararlılığı gibi özelliklere ihtiyaç duyar.

1.4. Lif Özelliklerinin Kompozitin Özelliklerine Etkisi

1.4.1.Lif Geometrisinin Etkisi

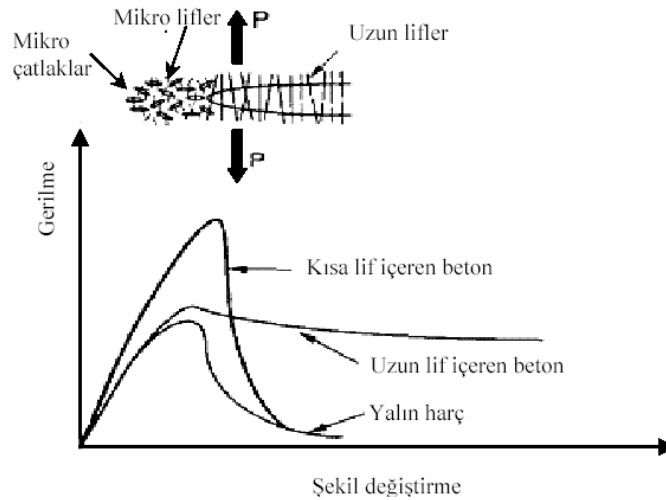
Lif geometrisi, lif ile matris arasındaki bağın dayanımıyla doğrudan ilişkilidir. Soroushian ve Bayasi (1991) tarafından yapılan bir araştırmada, lif tipi ile matris arasındaki etkileşimin lif donatılı betonların performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı geometrilere sahip, ancak benzer narinlikteki liflerle yapılan deneyler, lifli betonların işlenebilirliğini genellikle azalttığını ortaya koymuştur. Ancak, dalgalı liflerin düz ve kancalı liflere kıyasla çökme değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, değişken narinlik ve lif oranlarıyla yapılan testlerde, kancalı liflerin düz ve dalgalı

liflere göre kompozitlerin basınç gerilmeleri altında daha yüksek enerji absorbe etme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

1.4.2.Lif Boyunun Etkisi

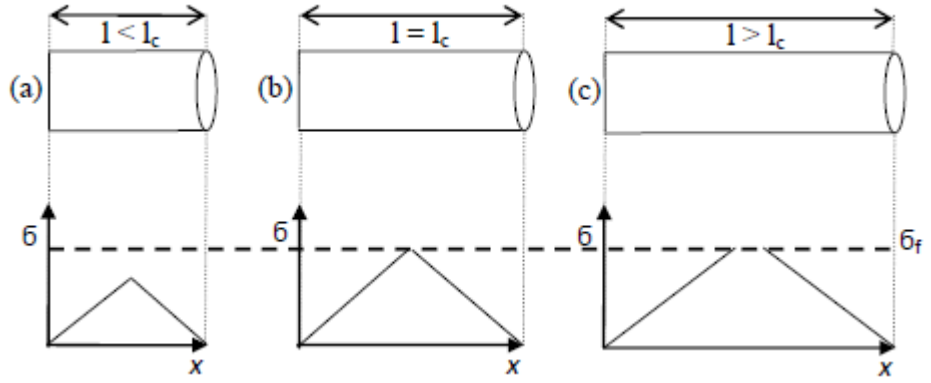
Elyafların kompozit malzemelerde etkili olabilmesi için belirli bir kritik uzunluğa sahip olmaları gerekir. Eğer elyaf uzunluğu bu kritik değerden daha kısa olursa, çekme gerilmesi sırasında elyaf yerinden çıkar ve kompozit malzeme üzerindeki etkisi ortadan kalkar. Ancak kritik uzunluktaki ve daha uzun elyafların bulunduğu kompozitlerde, çekme gerilmesi uygulandığında elyaflar kompozitle birlikte gerilime maruz kalır. Bu durum, elyafın kompozit üzerinde olumlu bir etki yaparak mekanik dayanımını artırmasına olanak tanır. Genellikle kompozit malzemelerde kullanılan elyaf çapı yaklaşık 10 μm civarındadır. Çapı daha da küçültmek, maliyeti artırdığından ve çok ince elyaflarla malzeme üretimi zor olduğundan, ticari açıdan tercih edilmez. Bu sebeple, kompozit malzemeler üzerine yapılan araştırmalar, elyaf uzunluğunu artırmaya ve elyaf-matris birleşmesini güçlendirmeye yönelik yoğunlaşmaktadır (Mathur, 2013).

Uzun lifler mikro ölçekteki çatlaklara ulaşamaz ve bu çatlakları engelleyemezler. Ancak betonun kırılmaya ulaşması durumunda, uzun lifler çatlaklar arasında köprüler oluşturarak betonun göçmesini engeller ve betona ekstra süneklik kazandırır. Kısa lifler ise, betonda ilk oluşan mikro çatlaklarla boyut olarak daha uyumlu olduğundan, ilk çatlak oluşana kadar daha yüksek gerilmeler gerektirir. Şekil 1.5'te farklı tel boylarının çatlak köprüleme üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



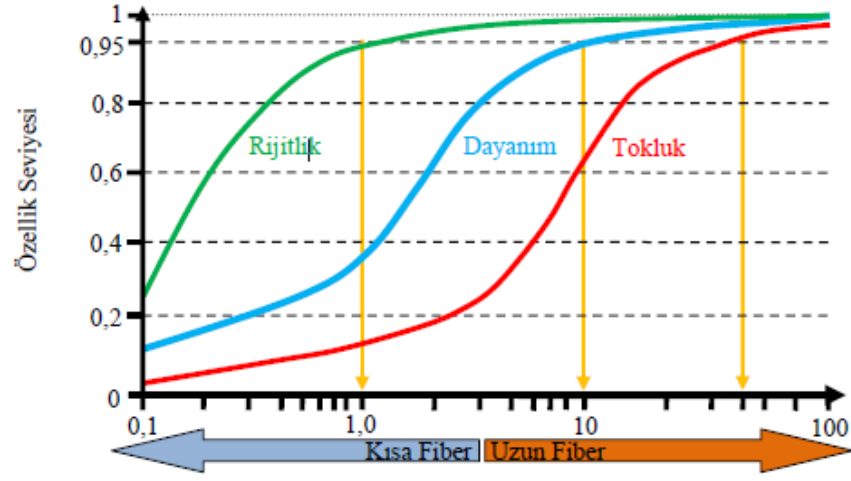
Şekil 1.5. Çatlak köprülenmesine farklı tel boyutlarının etkisi (Betterman, 1995)

Elyaf takviyeli kompozit malzeme, eş dağılımlı bir gerilmeye maruz kaldığında, gerçek elyaf boyu ile kritik elyaf boyu (l_c) arasındaki ilişkiye göre üç farklı durum ortaya çıkar. Elyaf uzunluğu kritik uzunluğa (l_c) eşit olduğunda, maksimum elyaf yükü yalnızca elyafın aksenal merkezine ulaşır. Eğer elyaf uzunluğu kritik uzunluktan büyükse, elyaftaki gerilme uçlarda düşük olur ve uygulanan gerilim karşı direnç elyafın orta kısmında maksimuma ulaşır. Elyaf uzunluğu kritik uzunluktan küçük olduğunda ise maksimum elyaf gerilmesi sağlanamaz ve yeterli miktarda gerilim direnci oluşturulamaz. Elyaf boyu kritik uzunluktan ne kadar uzun olursa, kompozitin mukavemeti ve tokluğuna o kadar fazla katkı sağlanır. Bu nedenle sürekli elyaf ($l > l_c$) ile takviye edilmiş kompozitler, süreksiz elyaf takviyeli kompozitlere göre daha yüksek mukavemet gösterir. Şekil 1.6'da matris malzemesinin elyaf üzerinde ilettiği yükün etkisi ve etki eden kuvvetin elyaf üzerindeki oluşturduğu gerilim şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Kritik elyaf ve elyaf uzunluğu ilişkisi (a) $l < l_c$ durumu (b) $l = l_c$ durumu (c) $l > l_c$ durumunda elyaf üzerinde oluşan kuvvetin dağılımları (Mathur, 2013)

Kompozit yapı içindeki elyaf boyunun artması, birçok mekanik özellikte iyileşmelere yol açmaktadır. Elyaf boyunun artışı ile gelişen temel mekanik özelliklerdeki değişim, kalitatif olarak Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Bu noktada, sürekli elyaf takviyesi ile güçlendirilmiş polimerik kompozitler, mekanik dayanım gerektiren yapısal uygulamalarda kısa ve uzun cam elyaflarıyla takviyelinmiş malzemelere göre bir adım daha öne çıkmaktadır (Smith ve diğ., 2013).



Şekil 1.7. Elyaf uzunluğunun mukavemet değerleri üzerindeki kalitatif etkileri (Mathur,2013)

2. İSTATİKSEL DEĞERLENDİRME VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, çalışma kapsamında elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapıldı ve optimizasyon süreci detaylandırılmıştır. İlk olarak, verilerin doğruluğu ve güvenilirliği belirlendi, ardından uygun istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Son olarak, süreç ve parametrelerin optimizasyonu sağlanarak en uygun koşullar belirlenmiştir.

2.1. Veri Setinin Tanımlanması ve Ön İşleme

Veri analizi sürecinde kullanılan ölçümler ve deneysel sonuçlar detaylandırılmıştır. Öncelikle, ham veriler toplanarak analiz edilebilir hale getirilmiştir. Veri setindeki olası hatalar, aykırı değerler ve eksik veriler belirlenerek uygun veri temizleme yöntemleri uygulanmıştır.

2.2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri

Bu çalışmada, deneysel sonuçların değerlendirilmesi için çeşitli istatistiksel tekniklerden yararlanılmıştır. Kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

- Tanımlayıcı İstatistikler: Ortalama, standart sapma, varyans gibi temel istatistikler hesaplanarak veri dağılımı hakkında bilgi edinilebilir.
- Regresyon Analizi: Değişkenler arasındaki ilişkileri incelemek için regresyon modeli oluşturulabilir ve korelasyon katsayıları değerlendirilebilir.
- Anlamlılık Testleri: Gruplar arasında fark olup olmadığını belirlemek için t-testi gibi istatistiksel testler uygulanabilir.
- Doğrulama ve Güvenilirlik Analizi: Veri setinin güvenilirliğini sağlamak adına R^2 katsayısı ve p-değeri gibi metrikler kullanılabilir.

2.3. Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon sürecinde, deneysel parametrelerin en iyi sonuçları verecek şekilde ayarlanması hedeflenebilir. Bu kapsamda kullanılan yöntemler şunlardır:

- Genetik Algoritmalar: Alternatif optimizasyon tekniklerinden biri olan genetik algoritmalar kullanılarak en iyi çözüm senaryoları modellenebilir.

- Deneyisel Tasarım (DOE): Optimum parametrelerin belirlenmesi için deneyisel tasarım yöntemleri uygulanabilir.
- Cevap Optimizasyonu: İstatistiksel analizlerden elde edilen verilere dayanarak en uygun koşullar belirlenebilir ve süreç iyileştirilebilir.

2.4. Determinasyon Katsayısı (R^2)

İstatistikte ve regresyon analizinde kullanılan bir ölçüttür. Bir modelin bağımsız değişkenlerinin, bağımlı değişkendeki değişimleri ne kadar iyi açıkladığını gösterir.

R^2 , genellikle 0 ile 1 arasında bir değer alır:

$R^2 = 0$: Bağımsız değişkenler, bağımlı değişkendeki değişimleri hiç açıklayamıyor.

$R^2 = 1$: Bağımsız değişkenler, bağımlı değişkendeki değişimleri tamamen açıklıyor.

R^2 ne kadar yüksekse, modelin açıklama gücü o kadar iyidir.

$$R^2 = 1 - (SST/SSE) \quad (\text{Denklem 2.1})$$

SSE (Sum of Squares for Error): Tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkların karesinin toplamı

SST (Total Sum of Squares): Gerçek değerlerin ortalamadan sapmalarının karesinin toplamı

3.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Polimer matrisli kompozitlerin özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan araştırmaların geniş bir yelpazede yapıldığını ve farklı materyal, işlem ve üretim yöntemlerinin kullanıldığını göstermektedir.

Palmer ve arkadaşları (2010), geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin takviye olarak kullanıldığı tabakalı kompozitlerin kalıplama yöntemiyle üretimini gerçekleştirmiş ve mekanik özelliklerin geleneksel üretim teknikleriyle karşılaştırılabilmesi için hacim oranı önemli bir parametre olduğunu vurgulamışlardır.

Hanif ve arkadaşları (2015), epoksi matrisli ve Twaron/Aramid takviyeli kompozitlerde homojen bir dağılım elde etmek amacıyla sonikasyon yöntemiyle çok duvarlı karbon nanotüpleri kullanarak, bu kompozitler üzerinde ASTM D5045 standardına uygun eğme testlerini farklı kuvvetlerde gerçekleştirmişlerdir.

Singh ve Samanta (2015), Kevlar hibridizasyonunun, özellikle düz laminatlar arasına kıyılmış liflerin kullanılması ile kompozitlerin delaminasyon mukavemetini arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Jaipal ve arkadaşları (2020), tabakalı kompozitlerde matris olarak kullanılan epoksi ve vinilester reçinelerinin, absorbe edilen enerjiyi en verimli şekilde kullanan matrisin epoksi olduğunu belirlemişlerdir.

Mahesh ve arkadaşları (2021), termal iletkenlik gereksinimleri, neme karşı koruma sağlama ve yüksek mukavemet gibi özellikler göz önünde bulundurulduğunda, en iyi seçeneğin polimer matrisli kompozitler olduğunu belirtmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2021), polimer matrisli kompozit malzemelerin tasarımında 'çapraz bağ' yönteminin kullanılmasıyla, tasarım farklılıklarının yeni mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin ortaya çıkmasına yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Lin ve Liu (2022), yaptıkları çalışmada akıllı kompozitlerin, polimer matrisli kompozitlerin şekillendirilebilirlik ve sertliğini artırırken, bazı elektriksel özellikleri olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir.

Muthusamy ve arkadaşları (2022), vinilester reçinelerinin uygun maliyeti, iyi özellikleri ve kolay bulunabilirliği ile bu tür çalışmalarda tercih edilen, diğer polimer reçinelerine kıyasla daha iyi erozyon performansı gösteren ideal bir reçine türü olduğunu vurgulamışlardır.

Bonsu ve arkadaşları (2022), bir polimer matrisli kompoziti deniz suyu ortamında mekanik davranışlarını incelemek amacıyla vinilester reçinesini kullanmalarının başlıca nedeninin, bu reçinenin neme dayanıklılığı ve fiyat açısından epoksi ve polyester reçineleri arasında optimal bir çözüm sunması olduğunu ifade etmişlerdir.

Literatürde bulunan çalışmaların bir kısmında ise takviyeli polimer malzemelerin delme işlemi üzerindeki çalışmaları ve delme işlemi sırasında kesme parametrelerinin (örneğin, ilerleme hızı, kesme hızı, matkap geometrisi) malzeme özelliklerine ve işleme sonuçlarına etkileri incelenmiştir.

Uysal (2015), takviyesiz poliamid ve karbon siyahı takviyeli poliamid malzemelerinin delme işlemi sırasında matkap ucu sıcaklığı ve talaş şekilleri üzerinde yaptığı incelemelerde, matkap ucu sıcaklığının devir hızının artması ve ilerleme hızının azalmasıyla arttığını tespit etmiştir. Ayrıca, karbon siyahının delinmesi sırasında daha yüksek delme sıcaklıkları gözlemlenirken, kesme hızının azalması ve ilerleme hızının artmasıyla daha düzenli helisel talaşların oluştuğu belirtilmiştir. Karbon siyahı takviyeli poliamid, takviyesiz poliamide kıyasla daha düzgün talaşlar üretmiştir.

Palanikumar ve arkadaşları (2016), cam elyaf takviyeli polipropilen (CET/PP) kompozit malzemesinin işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, delme işlemi sırasında itme kuvvetini etkileyen parametreleri incelemişlerdir. İlerleme hızının ve matkap çapının artmasıyla itme kuvvetlerinin arttığını, ancak devir hızının artışının itme kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir.

Phadnis ve arkadaşları (2013), karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) epoksi kompozit malzemelerinin delme işlemindeki kesme parametrelerinin itme kuvveti ve tork

üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Düşük ilerleme miktarı ve yüksek kesme hızlarının karbon/epoksi laminatların delinmesi için ideal koşullar olduğunu belirtmişlerdir.

Zitoune ve arkadaşları (2013), karbon kumaş elyaf takviyeli plastik (KETP) ve bakır örgülü laminatların delme işlemini incelemişlerdir. Çift uç açılı matkap kullanılarak yapılan delme işlemi, standart matkapla yapılan işlemlere kıyasla daha düşük itme kuvvetleri ve daha az ortalama pürüzlülük değerleri sağlamıştır.

Zinati ve Razfar (2014), çok duvarlı karbon nanotüp katkılı Poliamid 6 kompozit malzemenin işlenebilirliğini inceledikleri çalışmada, karbon nanotüpü kompozitlerin yüzey kalitesini katkısız Poliamid 6'ya göre düşük bir oranda iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Fıçıcı ve Ayparçası (2014), %30 cam fiber takviyesi bulunan Polipitilamit (PPA) matrisli kompozit malzemenin işlenebilirliğini inceledikleri çalışmada, delme işlemindeki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Kesme hızının artışıyla yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana geldiği, en düşük yüzey pürüzlülüğünün karbür matkap ucu ile elde edildiği, en yüksek pürüzlülüğün ise HSS matkap ucu ile olduğu tespit edilmiştir.

Ramesh ve arkadaşları (2014), polyester reçine ve cam, sisal, kenevir gibi takviye malzemelerinin kullanıldığı hibrit kompozitlerin işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, delme parametrelerinin delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve itme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İlerleme hızında ve matkap çapında artışa bağlı olarak itme kuvvetlerinin arttığını, maksimum torkun daha düşük devirde oluştuğunu ve maksimum delaminasyonun yüksek ilerleme hızlarında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Kuram (2016), Poliamid 6 ve %30 cam elyaf takviyeli Poliamid 6 kompozit malzemelerinin işlenebilirliğini incelediği çalışmasında, mikro freze işleminde cam elyaf takviyeli Poliamid 6'nın takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün takviyesiz Poliamid 6'ya göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir.

Vaxevanidis ve arkadaşları (2016), %30 cam elyaf takviyeli Poliamid 6 kompozit malzemesinin işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, en yüksek kesme hızında ve en düşük ilerleme hızında yüzey pürüzlülüğünün minimum düzeye indirildiğini tespit etmişlerdir.

Atık poliamid katkılı reçine malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde, bu çalışmaların genellikle malzeme işlenebilirliği veya genel kullanım özelliklerine odaklandığı görülmektedir. Ancak, atık poliamid katkılı reçinelerin mekanik karakterizasyonuna ve bu özelliklerin yanıt yüzey yöntemi ile optimize edilmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu durum, tez çalışmasının literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracağını ve sürdürülebilir malzeme geliştirme süreçlerine katkı sağlayacağını göstermektedir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneylerde kullanılan atık poliamid ve reçinenin kimyasal ve mekanik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiş, farklı katkı oranlarının malzeme davranışına etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, test numunelerinin hazırlanışına yönelik aşamalar detaylı bir şekilde açıklanmış olup, üretim sürecinde izlenen yöntemler, kullanılan ekipmanlar ve belirlenen standartlara uygunluk ele alınmıştır. Bununla birlikte, gerçekleştirilen çekme, eğilme ve sıyrılma testlerine ilişkin deney setlerinin bileşenleri, test koşulları ve ölçüm süreçleri kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında, mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik olarak çekme testi, üç noktadan eğilme testi ve sıyrılma testi uygulanmıştır. Bu testlerin gerçekleştirilebilmesi için, reçine ve İmaş Makine Sanayi AŞ tarafından üretilen kare eleklerde kullanılan poliamid malzeme kullanılmıştır. Elek geometrisi nedeniyle üretim sürecinde oluşan poliamid atıkları, test numunelerinin hazırlanmasında değerlendirilmiştir.

4.1.1. Poliamid 6 (PA6)

Deneysel çalışmalarda, İMAŞ A.Ş. (Konya/Türkiye) firmasından temin edilen ve Şekil 3.1’de gösterilen Poliamid 6 (PA6) polimer atığı kullanılmıştır. Poliamid 6,6’nın mekaniksel özelliklerine ilişkin değerler ise Tablo 4.1’de, İsviçre menşeli Sefar firması tarafından sağlanan bilgiler doğrultusunda sunulmuştur.



Şekil 4.1. Atık poliamid ipliği

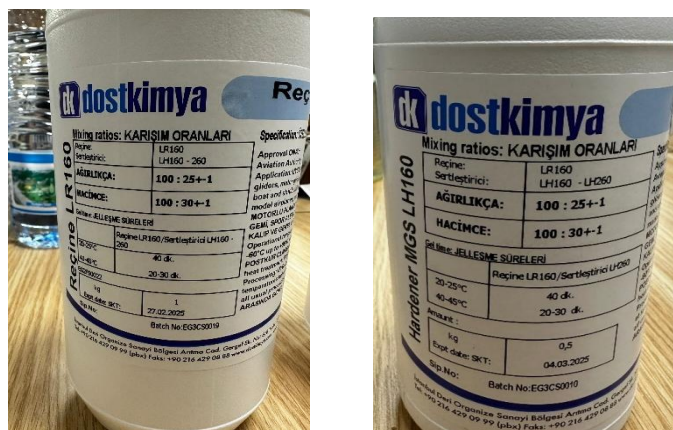
4.1.2. Reçine

Reçine, doğal veya sentetik kökenli, çeşitli uygulamalarda kullanılan polimer bazlı bir malzemedir. Genellikle yapışkan, viskoz ve sıvı halde olan reçineler, belirli koşullar altında katılaşıp sert bir forma dönüşebilir. Reçineler, kimyasal yapılarındaki farklılıklar ve özelliklerine göre sınıflandırılır ve geniş bir kullanım alanına sahiptir. Reçine sertlik, mukavemet, sıcaklık, kimyasal direnç, viskozite gibi özellikleri iyileştirir. Reçineler, sıvı halde güçlü yapışkanlık özelliği gösterirken, çeşitli katalizörler, sertleştiriciler veya ısı uygulamaları ile sertleşebilme yeteneğine sahiptir. Kimyasallara ve çevresel etkenlere karşı yüksek dayanıklılık sunar ve özellikle sentetik reçineler, termal ve elektriksel yalıtım özellikleriyle öne çıkar. Bu özellikleri sayesinde reçineler; fiber takviyeli polimerlerde bağlayıcı malzeme, dayanıklı yapıştırıcı ve koruyucu kaplama üretiminde, elektrik-elektronik sektöründe yalıtkan olarak ve tıp ile dişçilik alanlarında protez ve dolgu materyallerinin yapımında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ticari epoksi reçineleri alifatik, sikloalifatik veya aromatik arka bağlar içerir (Durmuş 2006).

Deney numunelerinin hazırlanmasında, Şekil 4.2'de gösterilen Propox Reçine LR160 kullanılmış ve sertleştirici olarak Propox Sertleştirici LH160 tercih edilmiştir.

Tablo 4.1. Poliamid 6.6 özellikleri (Üretici Verileri)

Karakteristik Özellikler	Poliamid 6.6	Reçine
Elastikiyet Modülü (MPa)	3500	3200
Çekme Mukavemeti (MPa)	85	80



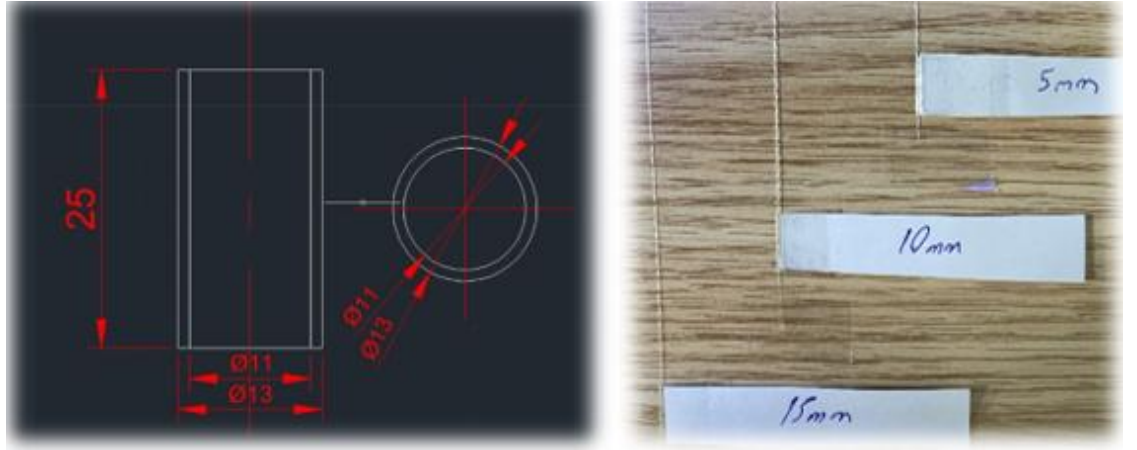
Şekil 4.2. Kullanılan reçine ve sertleştirici

4.2. Yapılan Deneyler ve Hesaplamalar

4.2.1. Sıyırılma Testi

Bu testte, reçineye yerleştirilen farklı uzunluklardaki poliamid ipliklerin çekme cihazında sıyırılma durumlarına göre optimum fiber uzunluğu belirlenmiştir. Sıyırılma testi, çekme testi düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Epoksi sertleşirken ipliklerin merkezlenmesini sağlamak amacıyla, Şekil 4.2’de gösterilen özel bir düzenek yapılmış ve sertleşme süreci boyunca her bir saatte merkezde olup olmadıkları kontrol edilerek küçük dokunuşlarla merkezde donmaları sağlanmıştır.

Belirlenen optimum fiber uzunluğu, reçineye belirli bir oranda katılarak malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. Aşağıdaki çekme test düzeneği kullanılarak TSE EN 12390-5 (2019) standardına göre 5, 10 ve 15 mm uzunluğundaki iplik boyları için sıyırılma testleri yapılmıştır. Şekil 4.3’te, AutoCAD programında çizilen kovan boyutları ve fiber iplik boyları; Şekil 4.4’te ise hazırlanan kovanların görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.5’te ise kontrollü bir şekilde epoksinin sertleşme görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.3. Kullanılan kovanın tasarımı ve iplik boyları

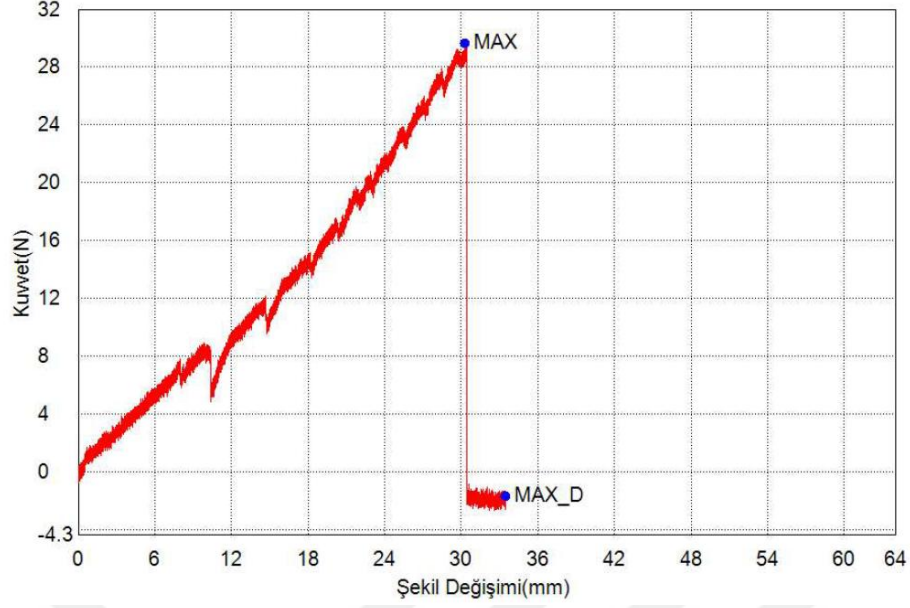


Şekil 4.4. Sıyırılma testi için yapılan kovanlar



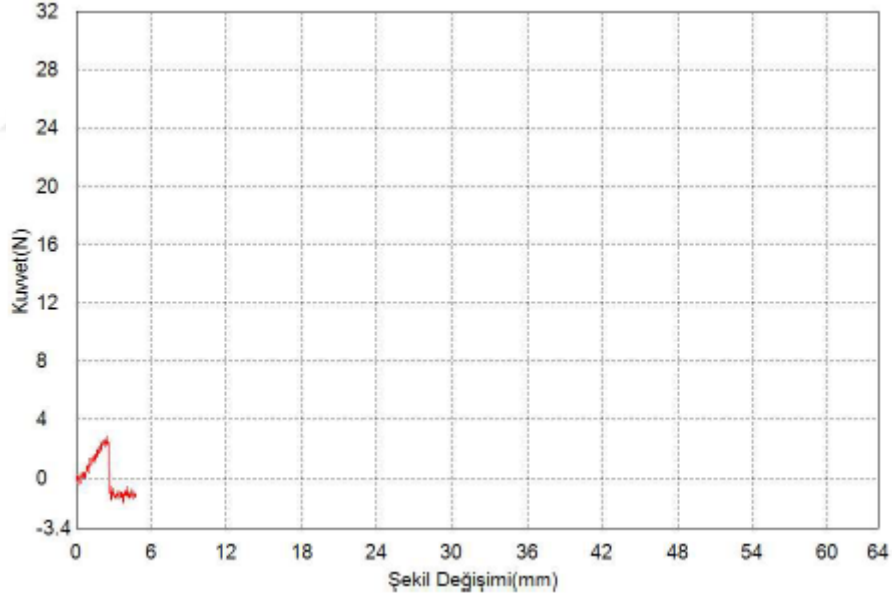
Şekil 4.5. Epoksi sertleşme süreci

Sıyırılma testinde kovanın içine gireceği bir silindir parça imal edilerek çekme deneyinde çenenin sıkma esnasındaki deformasyonunu ve sürtünme kuvvetini minimize etmek hedeflenmiştir. Atık poliamid kovanın içine belirlenen ölçülerde (5-10-15mm) daldırılıp reçine ve sertleştirici ilave edilmiştir. Reçineden 4 birim sertleştiriciden 1 birim eklendikten sonra iyice karıştırılarak sertleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Çekme testinde kullanılan fiber ipliğin kuvvet-şekil değişimi grafiği

Yukarıdaki Şekil 4.6'da fiber iplik çekme test cihazında test edilmiş ve 29.62 N kuvvete maruz kalmış sonrasında fiber iplik sıyrılmadan kopmuştur.



Şekil 4.7. Fiber sıyrılma testi (Fiber batma derinliği 5mm) Numune 1

Yukarıdaki Şekil 4.7'de 5mm epoksi reçine içerisine gömülmüş olan ipliğin sıyrılma test sonucu görünmektedir.

Bu grafikteki verilerden yola çıkılarak, Fiber için kuvvetler dengesi yazılarak F kuvveti ile fiber çekilmiştir buna karşılık direnen kayma gerilmesine eşitlenmiştir.

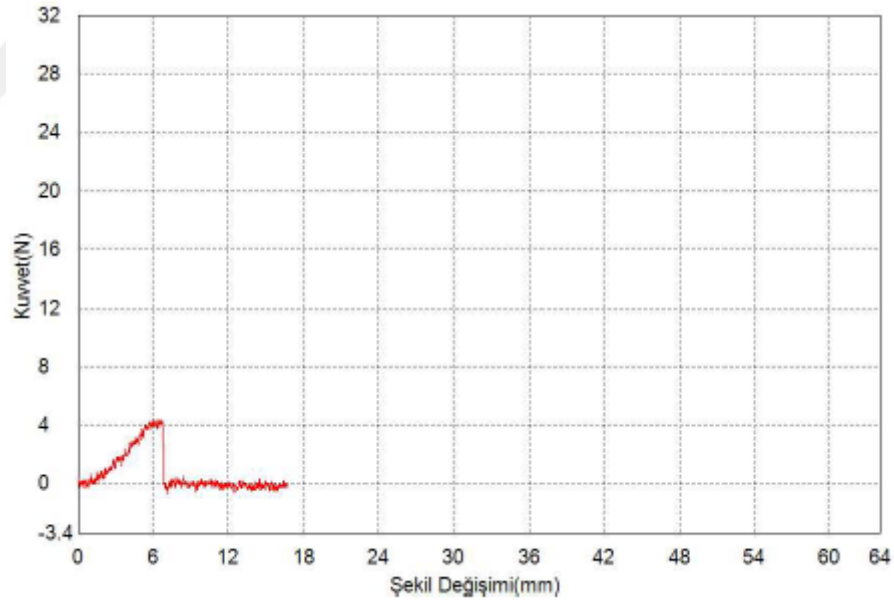
$$\tau = F/\pi D l \quad (\text{Denklem 4.1})$$

$$\sigma = F/(\frac{\pi x D^2}{4}) \quad (\text{Denklem 4.2})$$

$$L > \sigma D/4\tau \quad (\text{Denklem 4.3})$$

Denklem 4.1, 4.2 ve 4.3 kullanılarak $\tau = 0,61MPa$, $\sigma = 419MPa$ ve $L > 51,51 \text{ mm}$ bulunmuştur.

Fiber uzunluğu hesaplanan değerden büyük olması durumunda fiberin sıyrılmadan kopacağı anlamına gelmektedir. Amacımız kompozitin mukavemetini artırmak olduğu için fiberin sıyrılmadan kopması gerekmektedir. Fiberin sıyrılmaması durumunda ise yeterince kuvvet uygulayamadığımız anlamına gelmektedir. Bu durumda fiberden yeterince faydalanamadığımız anlamına gelmektedir.



Şekil 4.8. Fiber sıyrılma testi (Fiber batma derinliği 5mm) Numune 2

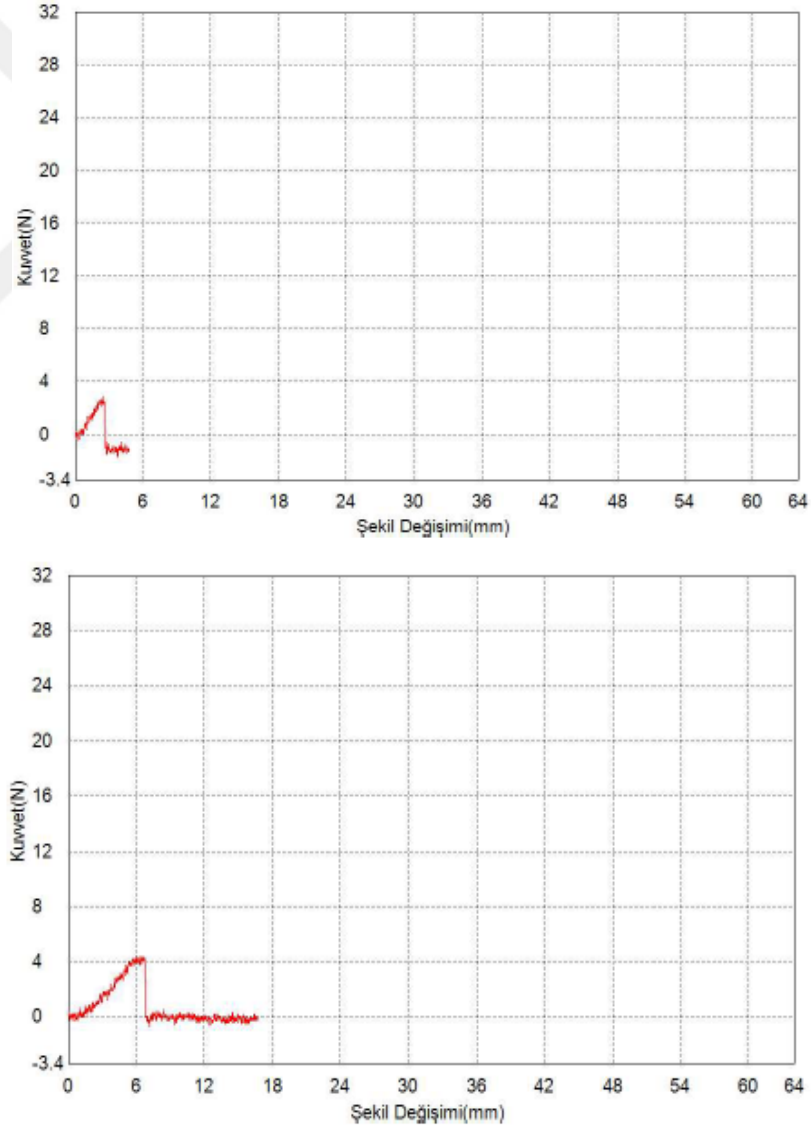
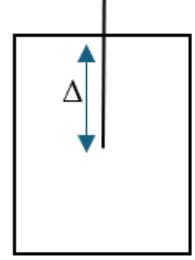
Yukarıdaki Şekil 4.8’de 5mm epoksi reçine içerisine gömülmüş olan ipliğin sıyrılmaması görülmektedir.

Aynı şekilde Denklem 4.1, 4.2 ve 4.3 kullanılarak $\tau = 0,92MPa$, $\sigma = 419MPa$ ve $L > 34,15 \text{ mm}$ bulunmuştur.

Yukarıdaki hesaplamalar yapılarak σ değeri ve farklı F kuvvetleri için çeşitli L uzunlukları bulunmuştur. Buna benzer olarak aynı hesaplamalar 5mm, 10mm ve 15 mm fiber batma derinliği için yapılmış ve fiber uzunlukları hesaplanmıştır. Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

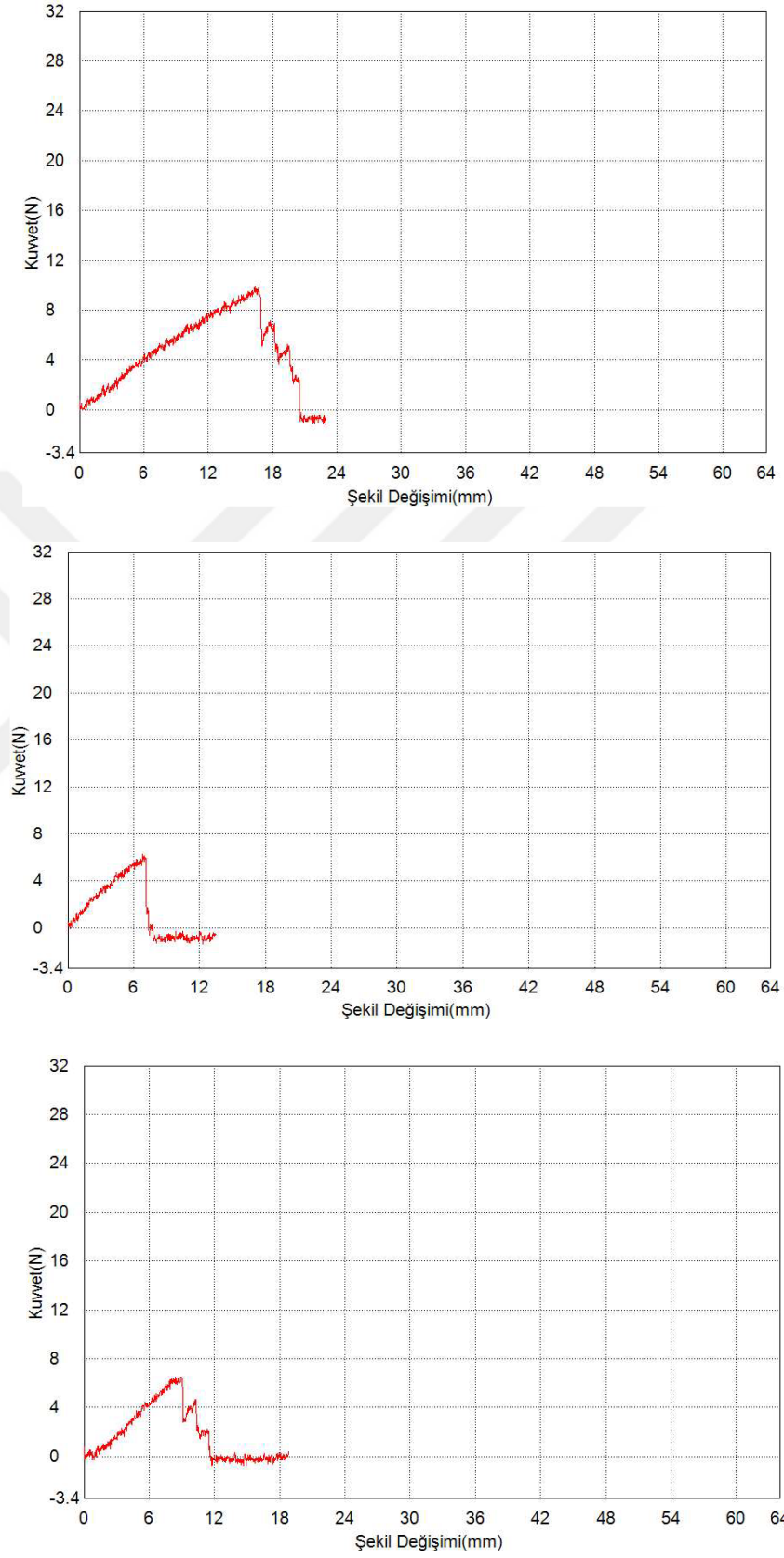
Tablo 4.2. Deneysel olarak elde edilen L kritik değerleri

Numune Sayısı	$\Delta=5$ mm	$\Delta=10$ mm	$\Delta=15$ mm
1.Numune	51.51	29.81	38.97
2.Numune	34.15	47.17	33.19
3.Numune		45.44	36.68



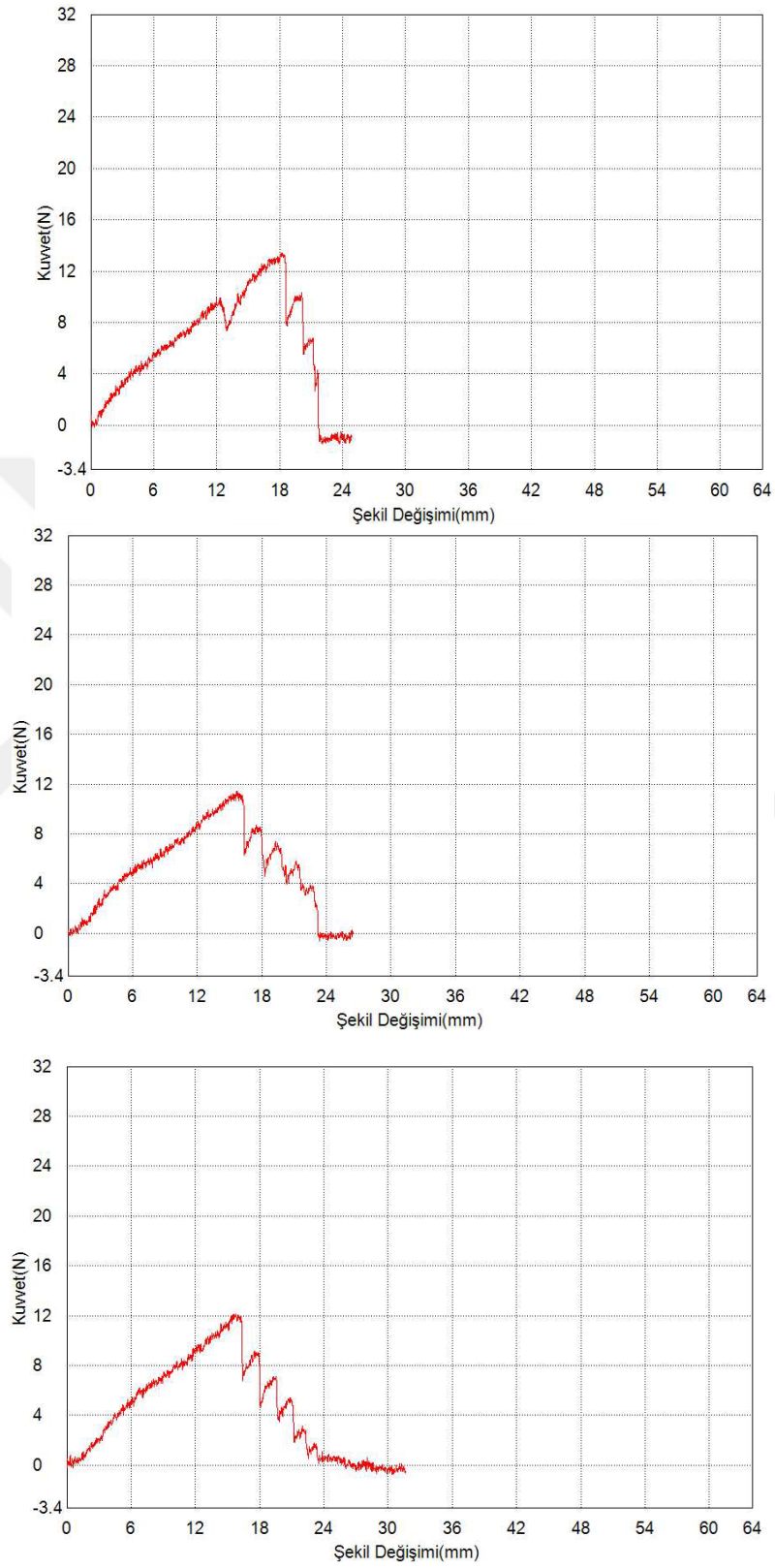
Şekil 4.9. 5 mm fiber batma derinliğinde kuvvet-şekil değişimi

Yukarıdaki Şekil 4.9’da 5 mm fiber batma derinliği için iki farklı kuvvet uygulanması doğrultusunda elde edilmiş kuvvet-şekil değişimi grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.10. 10 mm fiber batma derinliğinde kuvvet-şekil değişimi

Yukarıdaki Şekil 4.10'da 10 mm fiber batma derinliği için üç farklı kuvvet uygulanması doğrultusunda elde edilmiş kuvvet-şekil değişimi grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.11. 15 mm fiber batma derinliğindeki kuvvet-şekil değişimi

Yukarıdaki Şekil 4.11’de 15 mm fiber batma derinliği için üç farklı kuvvet uygulanması doğrultusunda elde edilmiş kuvvet-şekil değişimi grafikleri görülmektedir.

Aşağıdaki Tablo 4.3’te bulunan verilere ait istatistiksel değerlendirmeler sunulmuştur. Bu sonuçlara bakılarak 15 mm batma derinliğine sahip numuneler deneysel olarak tutarlı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3: Deney değerlerinin ortalama ve standart sapma sonuçları

Numune Sayısı	FİBER BATMA DERİNLİĞİ		
	5 mm	10 mm	15 mm
1.Numune	51.51	29.81	39.87
2.Numune	34.15	47.17	33.19
3.Numune		45.41	36.28
Ortalama	42.83	40.81	36.28
Standart Sapma	12.28	9.56	2.91
Değerlendirme	Kenar Etkileri Baskın	Kenar Etkileri Baskın	TUTARLI

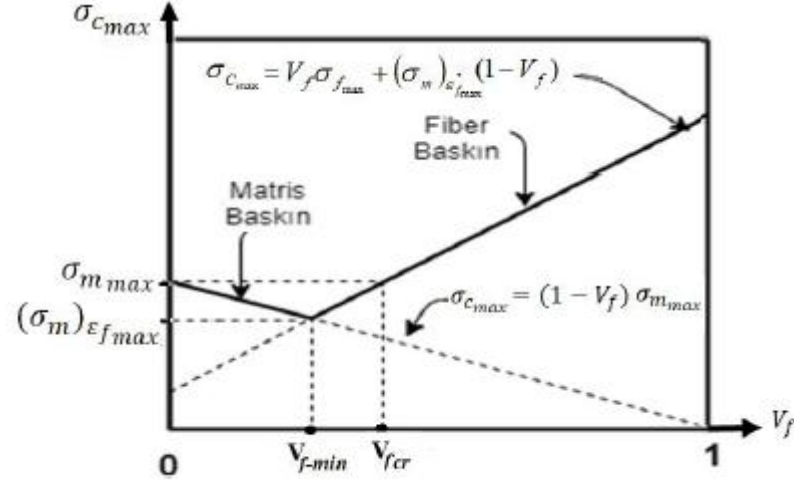
4.2.2.Kritik Fiber Hacim Oranı Hesabı

Mukavemet açısından düşündüğümüzde matrisi fiberlerle takviye etmekteki hedefimiz matristen daha dayanıklı bir yapı elde etmektir. O halde matris malzemeden daha dayanıksız bir kompozit tabaka üretmenin bir anlamı yoktur. Böyle bir problem fiber oranının belirli sınır değerlerin altında kalması durumunda ortaya çıkar. Fiberler matristen daha mukavimdir ancak belli bir sınırın altında kalınca kompozitin mukavemetini daha da düşürür. Fiber hacim oranı-kompozit mukavemetinin değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

Fiberler yük taşıması kompozitten mukavemet açısından verim alındığı anlamına gelmez. Kompozitten verim alınabilmesi için kompozitin mukavemetinin matristen daha büyük olması gerekir. Çünkü matris malzemeyi fiberle takviye etmemizdeki amaç zaten budur. Bu ise fiber oranının belli bir sınır değerden daha yüksek olmasıyla mümkündür.

$$V_{fmin} = \frac{E_m(\epsilon_{mmax} - \epsilon_{fmax})}{E_f \epsilon_{fmax} + E_m \epsilon_{mmax} - E_m \epsilon_{fmax}} \quad (\text{Denklem 4.4})$$

$$V_{fcr} = \frac{E_m(\epsilon_{mmax} - \epsilon_{fmax})}{\epsilon_{fmax}(E_f - E_m)} \quad (\text{Denklem 4.5})$$



Şekil 4.12. Fiber hacim oranı-kompozit mukavemetinin değişimi (Shah,2013)

- $0 < V_f < V_{f-min}$ bölgesinde fiberler hemen kopar ve tüm yükü matris taşır. Kompozit mukavemeti matrisin hasara uğradığı an kabul edilir.
- $V_{f-min} < V_f < V_{f-cr}$ bölgesinde: fiberler yük taşır ancak kompozitten verim alınmaz.
- $V_f < V_{f-cr} < 1$ bölgesinde: fiberler yük taşır ve kompozitten verim alınır.

Bu bilgilere dayanarak;

$$\sigma_m = 80 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_f = 85 \text{ Mpa}$$

$$E_f = 3500 \text{ Mpa}$$

$$E_m = 3200 \text{ Mpa}$$

Yukarıda verilen değerler fiber ve matris için üretici firmalardan malzemelerin mekanik özelliklerinden alınmıştır.

$$\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m$$

$$\epsilon_m = 0,025$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_f$$

$$\epsilon_m = 0,025$$

Sonuç olarak;

$$V_{fmin} = \frac{E_m(\varepsilon_{mmax} - \varepsilon_{fmax})}{E_f \varepsilon_{fmax} + E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} = 0,036 \approx \%3,6$$

$$V_{fcr} = \frac{E_m(\varepsilon_{mmax} - \varepsilon_{fmax})}{\varepsilon_{fmax}(E_f - E_m)} = 0,44 \approx \%44 \text{ bulunur.}$$

• $V_f < V_{fcr} < 1$ bölgesinde: fiberler yük taşır ve kompozitten verim alınır.

Bu sonuçlara göre hazırlanacak kompozisyon oranları belirlenir. Tablo 4.4' de bu oranlar verilmiştir.

Tablo 4.4. Hesaplama göre deneylerde kullanılacak kompozisyon ve oranları

Oran Sayıları	% Reçine	%Atık Poliamid
1.Oran	95	5
2.Oran	90	10
3.Oran	85	15

4.2.3. Çekme Testi

Çekme testi, bir numunenin kopana dek tek ekseninde çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı temel bir malzeme bilimi testidir. ASTM D6641 standartlarına göre %5,%10 ve %15 hacimce fiberler eklenerek çekme testi yapılmıştır. Bu standarta göre numune ölçüleri 140 mm uzunluk, 12 mm genişlik ve 3 mm kalınlığında olmalıdır.

4.2.4. Üç Noktadan Eğilme Testi

ASTM D7264, bir kiriş üzerinde desteklenen dikdörtgen kesitli bir çubuk kullanılarak polimer matris kompozitlerin eğilme özelliklerinin test edilmesini özetlemektedir.

Numune boyutu: Standart numune kalınlığı 4 mm (0,16 inç), standart numune genişliği 13 mm (0,5 inç) ve standart numune uzunluğu, destek açıklığından (80 mm) %20 daha uzundur. Standart numune mevcut değilse, alternatif numune boyutları kullanılabilir. Bu standarta göre numune ölçüleri 96 mm uzunluk, 13 mm genişlik ve 4 mm kalınlığında olmalıdır.

$$\sigma_f = 3FL/2bd^2$$

(Denklem 4.6)

F: Tepe noktası kuvveti, Newton (N) cinsindendir ve malzemeye maksimum yük uygulandığında ölçülür.

L: Destek açıklığı, milimetre (mm) cinsindendir ve test düzenindeki destek noktaları arasındaki mesafeyi temsil eder. (80mm)

b: Test kirişi genişliği, milimetre (mm) cinsindendir ve test edilen malzeme numunesinin genişliğini ifade eder. (13mm)

d: Test edilen kirişi derinliği ve kalınlığı, milimetre (mm) cinsindendir. Bu parametre, numunenin kalınlık ve derinlik ölçülerini içerir. (4mm)

Eğilme mukavemeti σ_f (MPa) cinsinden hesaplanmış olup, malzemenin eğilme dayanıklılığını ifade etmektedir. Bu parametreler, test edilen malzemenin yük-altında sergilediği davranışı anlamada ve malzeme performansını analiz etmede temel veriler sunmaktadır.

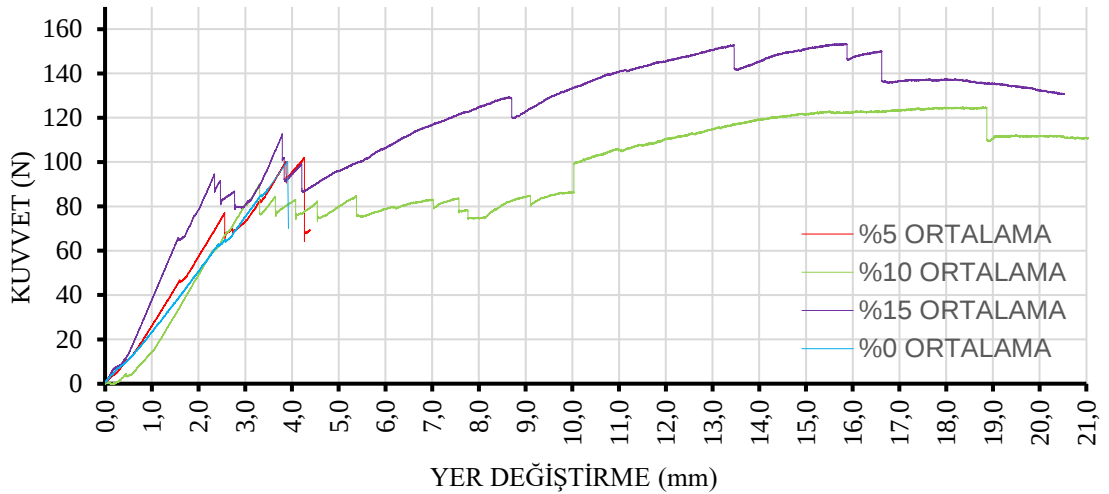
5.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışmamız kapsamında elde edilen araştırma bulguları sunulmaktadır. Çalışmanın temel amacı, atık poliamid katkısının reçine mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu doğrultuda, üç noktadan eğilme testi ve çekme testi gibi deneysel yöntemler uygulanmıştır.

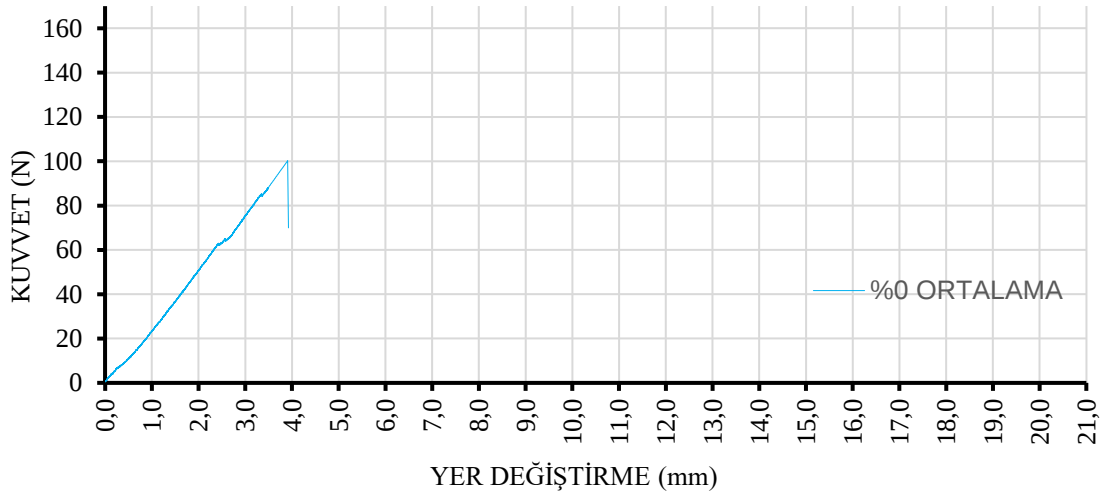
Elde edilen deney sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılarak analiz edilmiş ve atık poliamid katkısının mukavemet, elastiklik modülü ve tokluk üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, poliamid katkısının malzeme performansı üzerindeki potansiyel iyileştirici etkileri bilimsel bir çerçevede tartışılmıştır.

5.1. Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçları

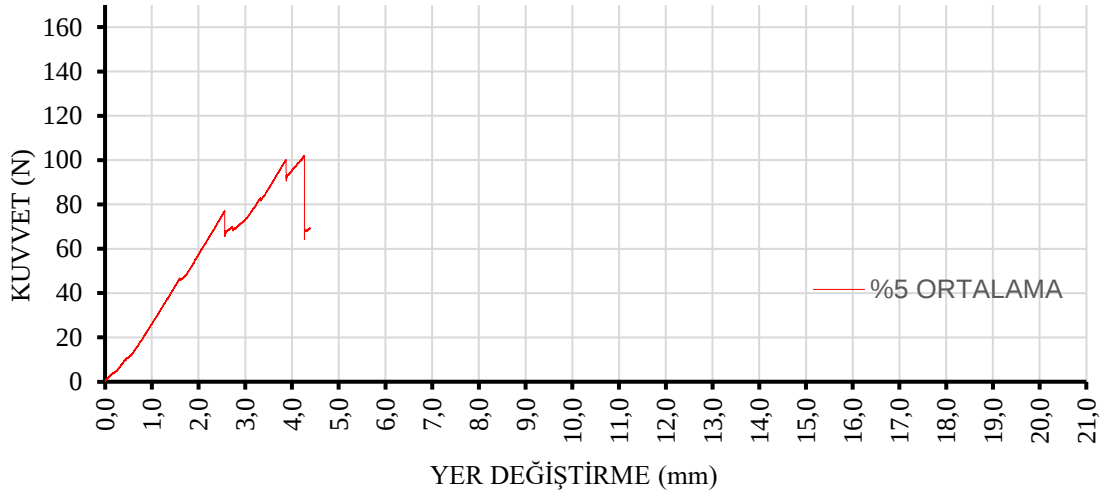
Üç nokta eğilme testi sonuçlarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği, Şekil 5.1’de sunulmaktadır. Bu test, atık poliamid katkısının reçine bazlı malzemelerin eğilme mukavemeti ve elastiklik modülü üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1, uygulanan kuvvet ile malzemenin yer değiştirme miktarı arasındaki ilişkiyi göstermekte olup, farklı poliamid katkı oranlarının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için önemli bir temel oluşturmaktadır. Elde edilen veriler doğrultusunda, katkı oranına bağlı olarak malzemenin eğilme mukavemetindeki ve elastiklik modülündeki değişimler analiz edilerek, poliamid katkısının yapısal performansa etkileri detaylandırılmıştır.



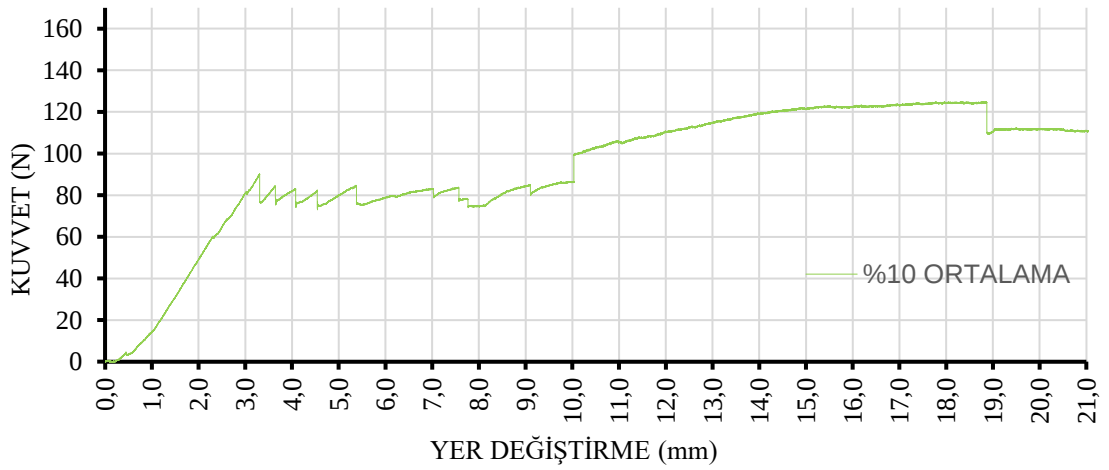
Şekil 5.1 Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının Ortalama Değerleri



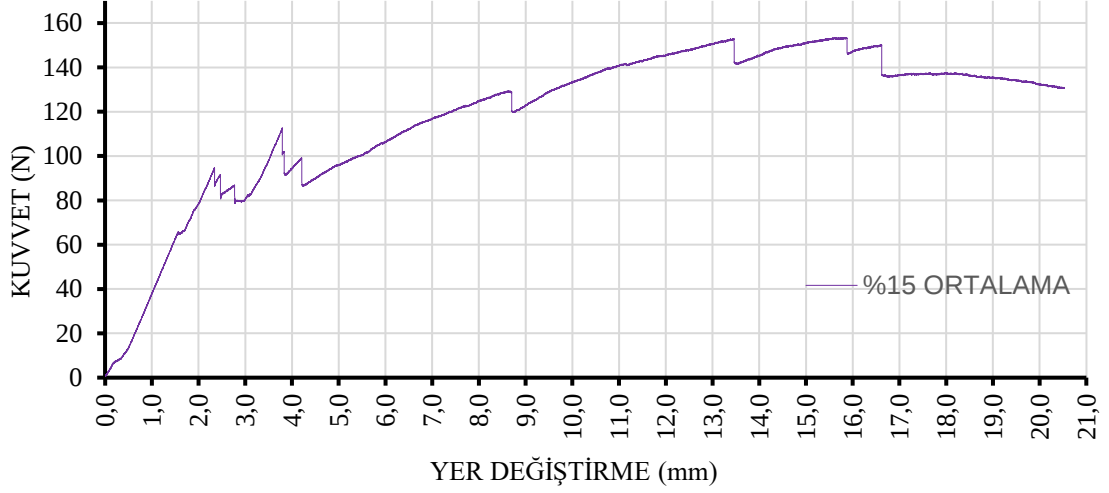
Şekil 5.2 Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının %0 Ortalama Değerleri



Şekil 5.3 Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının %5 Ortalama Değerleri



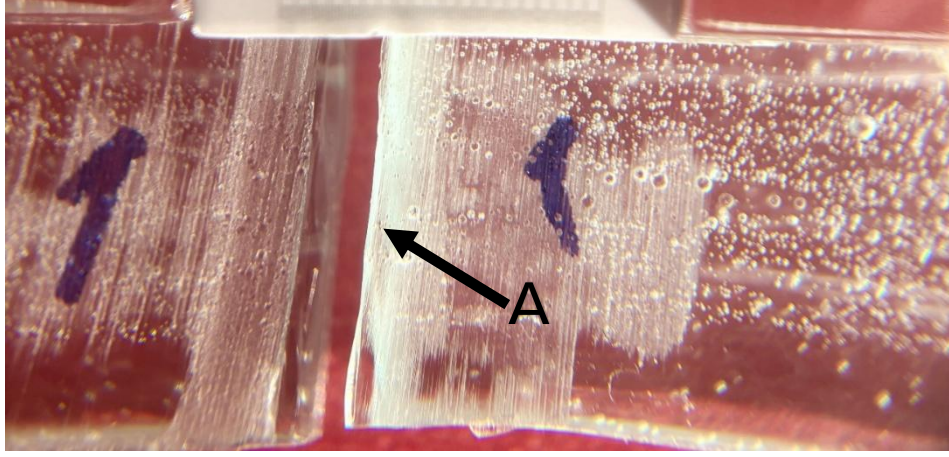
Şekil 5.4 Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının %10 Ortalama Değerleri



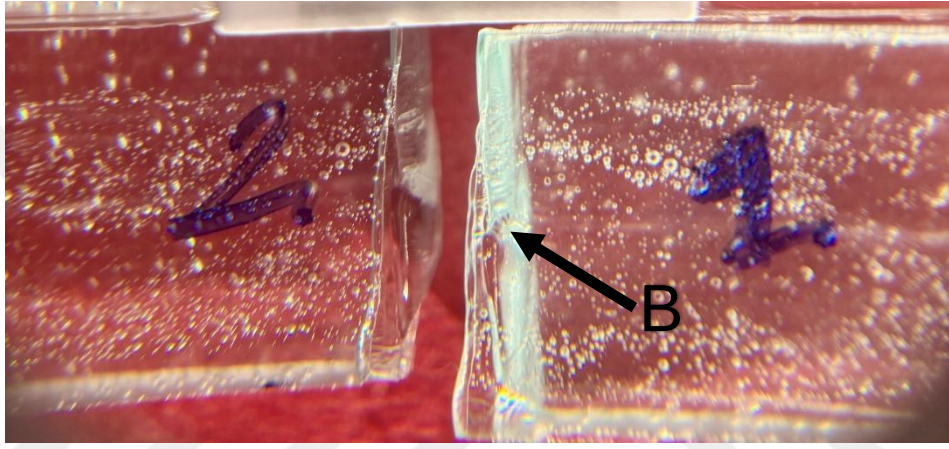
Şekil 5.5 Üç Noktadan Eğilme Testi Sonuçlarının %15 Ortalama Değerleri

Şekil 5.6 ile Şekil 5.21 arasında, üç noktadan eğilme testi sonrası numunelerin kırılma davranışları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu kapsamda, hacimce %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık poliamid içeren numunelerin test sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Her bir numunenin kırılma yüzeyi, oluşan çatlak yapısı ve deformasyon durumu dikkatle incelenmiş, poliamid katkı oranının mekanik davranış üzerindeki etkileri görsel olarak ortaya konmuştur. Elde edilen görüntüler, katkı miktarına bağlı olarak numunelerin kırılma mekanizmasında meydana gelen değişimleri değerlendirmek amacıyla sunulmuştur.

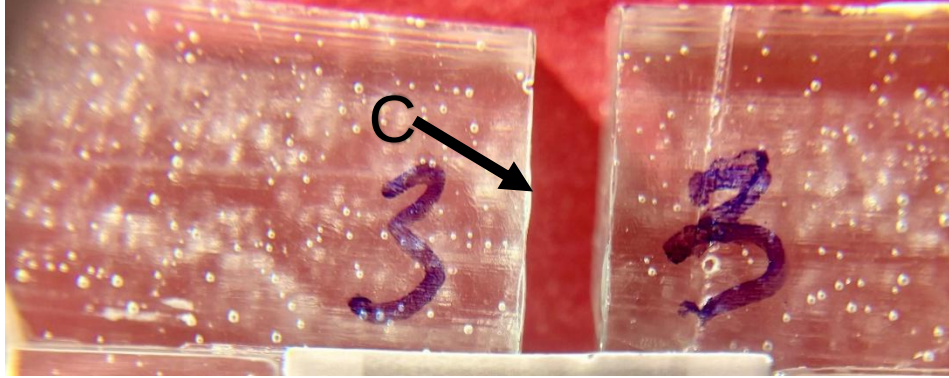
Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilen A, B ve C harfleri, %0 atık poliamid katkılı numunelerde meydana gelen kırılmaları temsil etmektedir. Kırılma türü incelendiğinde, %0 atık poliamid içeren numunelerde polimer matrisinin yeterli esneklik sağlamadığı ve yük altında ani kırılmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir. Şekil 5.9’da numunelerin genel görünümü sunulmuş olup, 100 N uygulanan yük sonrasında %0 N1 ve %0 N2 numunelerinde benzer bölgelerden kırılma meydana gelirken, %0 N3 numunesinde ise kırılmanın iki farklı noktada gerçekleştiği gözlemlenmiştir. %0 N3 numunesinde gözlemlenen çift noktalı kırılmanın temel nedenlerinden biri, malzemenin mikro yapısındaki heterojenlik veya lokal kusurların varlığı olarak değerlendirilebilir. Özellikle üretim sürecinde oluşabilecek mikro çatlaklar, hava boşluklarının yoğunluğu iki farklı noktadan kırılmaya sebep olmuştur.



Şekil 5.6 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.7 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 2

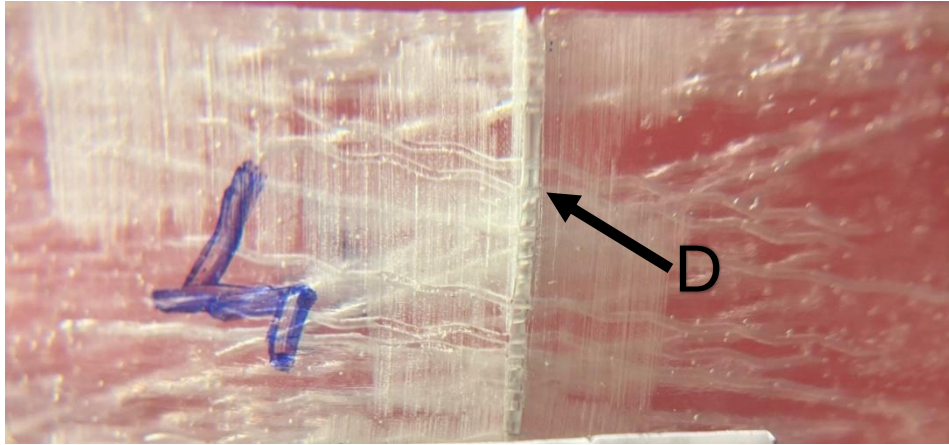


Şekil 5.8 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 3

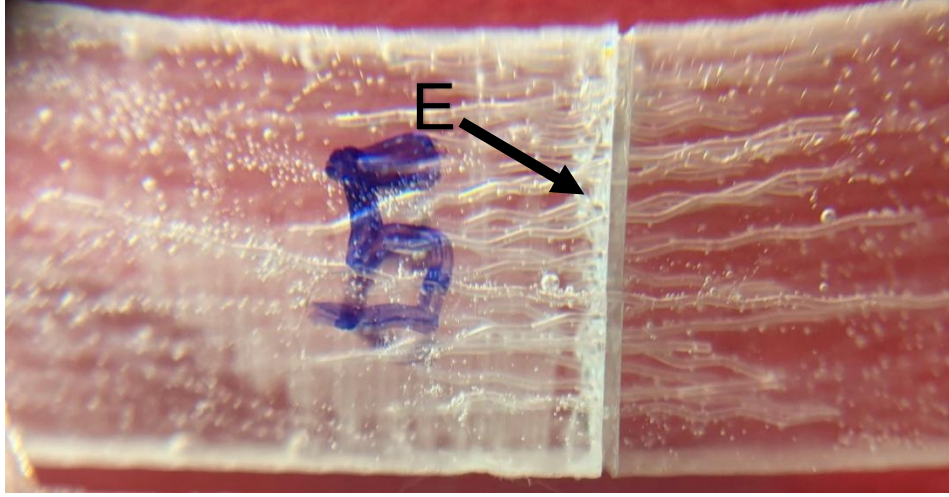


Şekil 5.9 %0 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü

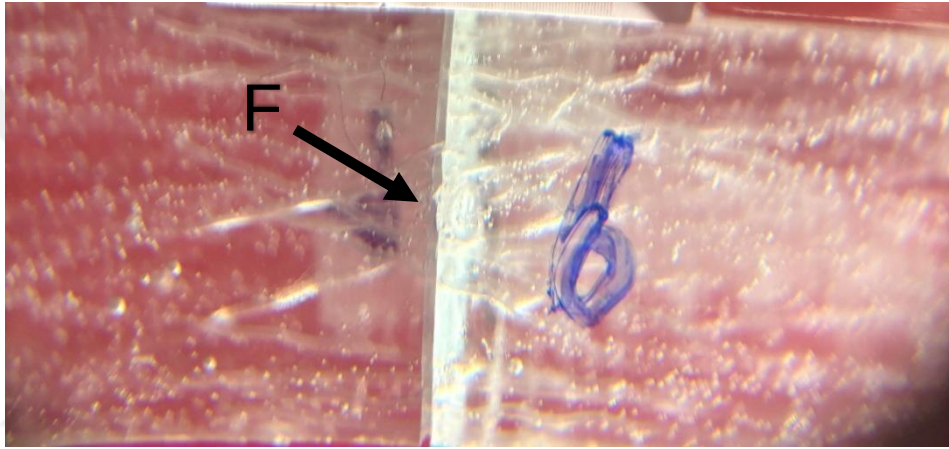
Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gösterilen D, E ve F harfleri, %5 atık poliamid katkılı numunelerde meydana gelen kırılmaları temsil etmektedir. Şekil 5.13’te numunelerin genel görünümü sunulmuş olup kırılmalar ve eğilmeler benzer oranda olduğu gösterilmiştir. Kırılma türü incelendiğinde benzer şekilde 100 N uygulanan yük sonrasında kırılma gerçekleşmiş ancak içerisinde bulunan fiberlerin sayesinde yapısal bütünlüğü koruyarak tamamen parçalanmamıştır. Ayrıca, düşük oranlarda fiber içeren numunelerde, kuvvet düşüşü sonrası fiberlerin yük taşımaya devam ettiği ve bu nedenle belirli bir tutunma etkisi gözlemlendiği belirlenmiştir.



Şekil 5.10 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.11 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 2

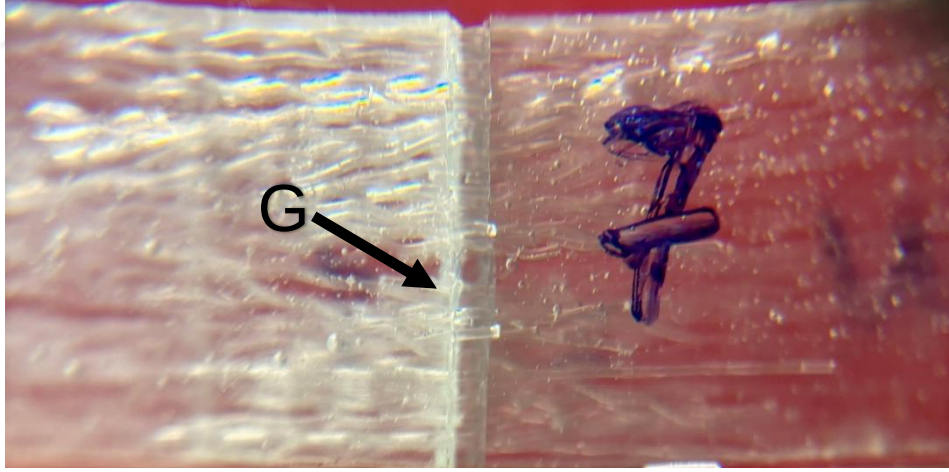


Şekil 5.12 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 3

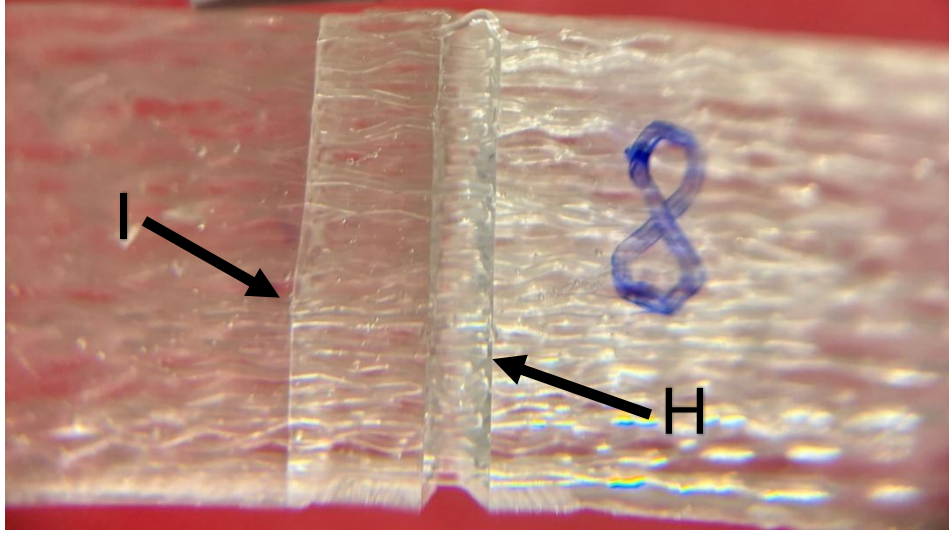


Şekil 5.13 %5 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü

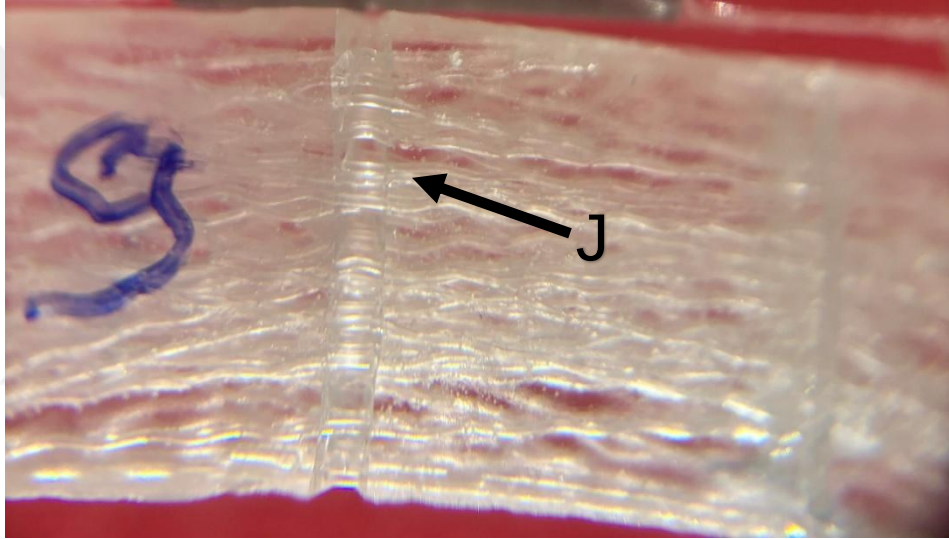
Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da gösterilen G, H, I ve J harfleri, %10 atık poliamid katkıli numunelerde meydana gelen kırılmaları temsil etmektedir. Şekil 5.17’de numunelerin genel görünümü sunulmuş olup kırılmaların benzer oranda olduğu gösterilmiştir. Atık poliamid katkı oranı arttıkça, numunelerin eğilme testlerindeki yük taşıma kapasitelerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Atık poliamid katkısı %10 seviyesine çıkarıldığında numunelerin 125 N’a kadar yük taşıdığı ve belirgin şekilde Slip-Stick (Tut-Bırak) etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 5.14 ve şekil 5.16 da benzer kırılmalar oluşurken Şekil 5.17’de ana kırılma diğer şekillere benzerken ayrıca yan kırılma (I harfi ile gösterilmiştir.) gözlemlenmiştir. Ana kırılmaya ek olarak, malzemenin belirli bölgelerinde lokal zayıflama veya farklı gerilme birikimlerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu durum, numune içerisindeki fiberlerin dağılımı, fiber-matris yapışmasının homojen olmaması veya üretim sürecinden kaynaklanan mikro kusurlar gibi etkenlerin bir sonucu olabilir. Böylece, ana kırılmanın yanında ortaya çıkan bu yan kırılma, numunenin yük altında karmaşık bir kırılma mekanizması sergilediğini ve yapısal bütünlüğün korunmasında ikinci bir kırılma yolunun devreye girdiği düşünülebilir.



Şekil 5.14 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.15 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 2

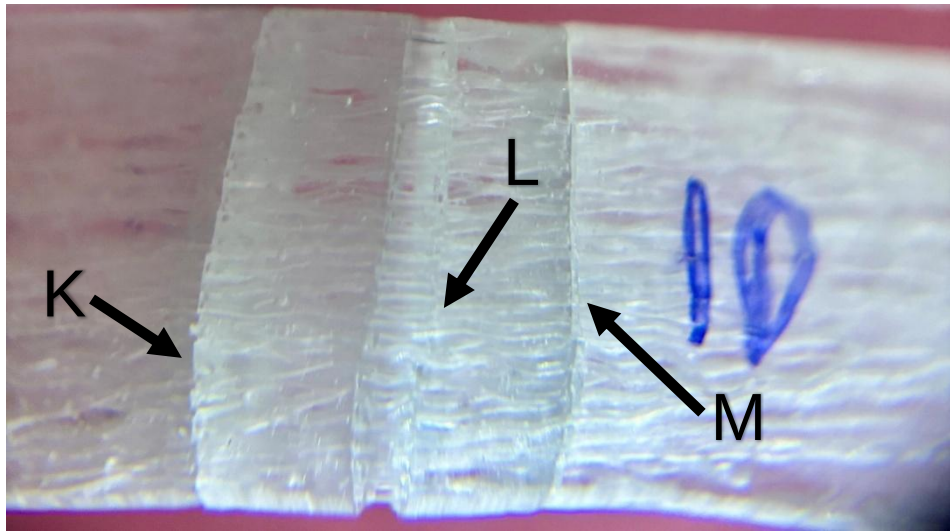


Şekil 5.16 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 3

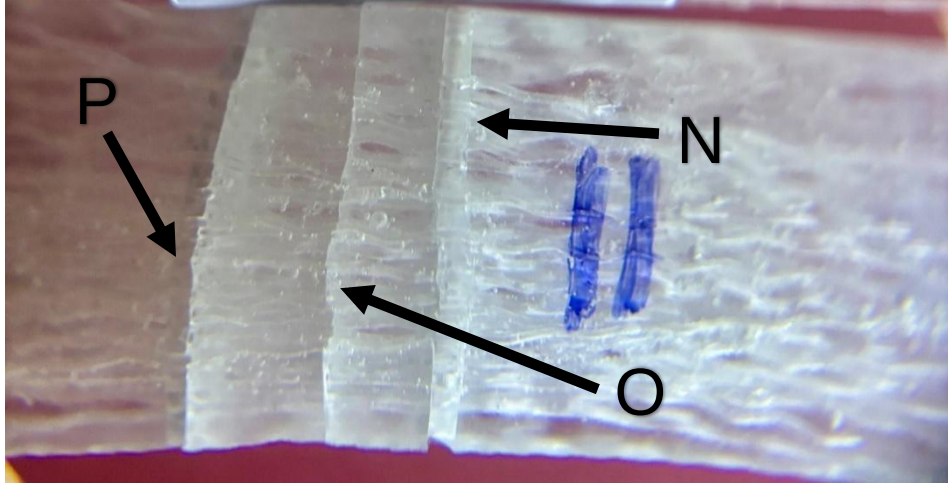


Şekil 5.17 %10 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü

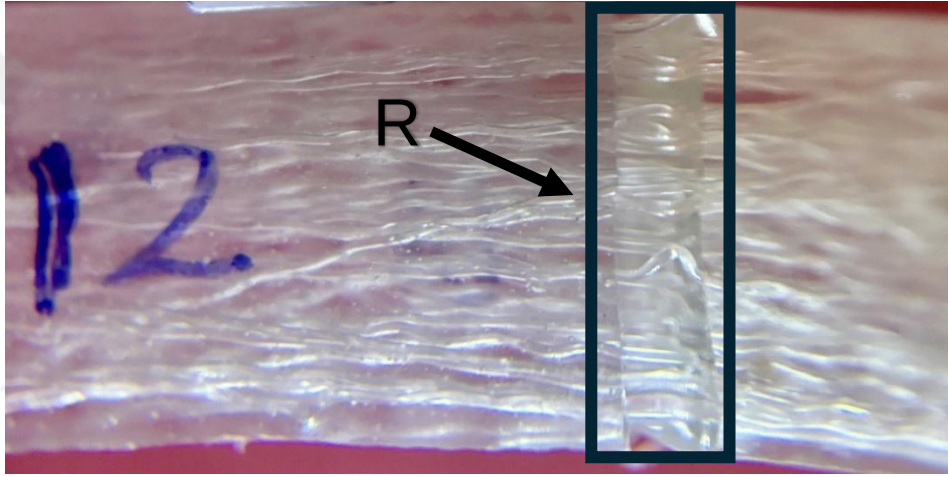
Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20’de gösterilen K, L, M, N, O, P ve R harfleri, %15 atık poliamid katkılı numunelerde meydana gelen kırılmaları ve eğilmeleri temsil etmektedir. Şekil 5.21’de numunelerin genel görünümü sunulmuş olup kırılmalar ve eğilmeler şekil 5.18 ve şekil 5.19’da benzer oranda olduğu gösterilmiştir ancak şekil 5.20’de farklı bir kırılma meydana gelmiştir. Atık poliamid katkı oranı arttıkça, numenlerin eğilme testlerindeki yük taşıma kapasitelerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Atık poliamid katkısı %15 seviyesine çıkarıldığında numunelerin 157 N’a kadar yük taşıdığı ve belirgin şekilde Slip-Stick (Tut-Bırak) etkisi Şekil 5.15’te ani düşümler ve devam eden yüklemelerde gözlemlenmiştir. Bu durum, fiber miktarının artmasıyla birlikte yük taşıma kapasitesinin de arttığını göstermektedir. Ayrıca, en yüksek poliamid katkı oranına sahip numunelerin, daha düşük oranlardaki numunelere kıyasla daha fazla plastik deformasyon kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.18 ve şekil 5.19 da benzer kırılmalar meydana gelmiştir. Bu L ve O harfleri ana kırılmaları gösterirken K, M, O ve P harfleri yan kırılmaları göstermektedir. Bu durum, numune içerisindeki fiberlerin dağılımı, fiber-matris yapışmasının homojen olmaması veya üretim sürecinden kaynaklanan mikro kusurlar gibi etkenlerin bir sonucu olabilir. Böylece, ana kırılmanın yanında ortaya çıkan bu yan kırılma, numunenin yük altında karmaşık bir kırılma mekanizması sergilediğini ve yapısal bütünlüğün korunmasında ikinci bir kırılma yolunun devreye girdiği düşünülebilir. Şekil 5.20’de kırılma tek bir noktadan gerçekleşirken fiberlerin bariz şekilde sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Lifler bütünlüğünü büyük ölçüde koruyor bu da yük taşımanın büyük kısmının fiberler tarafından karşılandığını göstermektedir.



Şekil 5.18 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.19 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 2



Şekil 5.20 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 3



Şekil 5.21 %15 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü

Eğilme testi sırasında, Slip-Stick (Tut-Bırak) etkisi olarak adlandırılan bir olgu gözlemlenmiştir. Bu etki, fiberlerin tırtıklı yapısından kaynaklanmakta olup, grafikte ani kuvvet düşüşleri şeklinde kendini göstermektedir. Yük uygulandığında, fiberlerin tırtıklı yüzeyi kuvvetin artmasına neden olmakta, ancak fiberin yüzeyden kurtulmasıyla ani bir kuvvet düşüşü yaşanmaktadır. Bu süreç, fiberlerin yüzeye yeniden tutunarak yük taşımaya devam etmesiyle tekrar etmekte ve fiber miktarına bağlı olarak değişken yük taşıma davranışları ortaya çıkmaktadır. Bu durum, grafikte dalgalanmalar şeklinde kendini ortaya çıkarmış olduğu gözlemlenmiştir.

Bu parametreler, test edilen malzemenin yük altında sergilediği davranışı anlamada ve mekanik performansını analiz etmede temel veriler sunmaktadır. Denklem 4.6'ya dayanarak, her bir numunenin mukavemet değerleri maksimum kuvvete göre hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Bu verilere göre, %5 ve %10 poliamid katkılı numunelerde eğilme mukavemetinin katkısız numuneye göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak, fiber hacim oranı kritik fiber oranına yaklaştıkça, mukavemet değerinin katkısız numune ile eşitlenmesi gerektiği öngörülmektedir. Kritik fiber oranının aşılması durumunda ise eğilme mukavemetinin artması beklenmektedir. Bununla birlikte, %15 katkı oranı, kritik fiber oranı olan %44 değerinden daha düşük olmasına rağmen, eğilme mukavemetinin katkısız numuneninkini aştığı tespit edilmiştir.

Bu durumun temel sebebi, eğilme testi sırasında uygulanan kuvvet doğrultusunda numunenin kalınlığının azalması ve numune içerisindeki fiberlerin doğrultusunda sürtünmenin artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, fiber miktarı arttıkça eğilme mukavemeti, katkısız numunenin mukavemet değerini aşmıştır.

Tablo 5.1 Eğilme Mukavemet Değerleri (MPa)

Eğilme Muk.	%0	%5	%10	%15
Numune 1	59.90	57.50	60.80	110.30
Numune 2	88.00	69.10	79.30	90.50
Numune 3	68.60	77.25	68.00	72.40
Ortalama	72.16	67.95	69.36	91.06
Standart Sapma	14.38	9.92	9.32	18.95
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	19.85	13.69	12.86	26.15
Alt Sınır	52.31	54.25	56.49	64.90
Üst Sınır	92.00	81.64	82.23	117.22

Tablo 5.2’de, eğilme mukavemeti serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasına ait $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları sunulmaktadır. Bu tabloya göre, P değeri 0.05’ten büyük olduğundan, seriler arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, farklı poliamid katkı oranlarına sahip numunelerin eğilme mukavemeti açısından istatistiksel olarak birbirinden farklı olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, %0-%5, %5-%10 ve %10-%15 serileri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

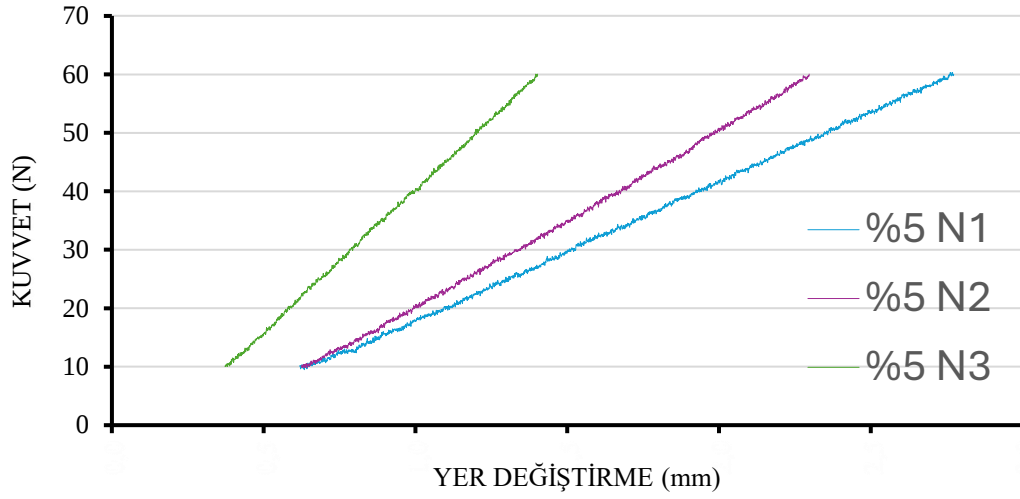
Tablo 5.2 İstatistiksel Olarak Eğilme Mukavemet Değerlerinin Karşılaştırılması

Varyans Analizi Ortalamalar İçin İki Örnek	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.3255	0.4134	0.1311
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.3487	0.4134	0.1311
	0.3487	0.4329	0.086

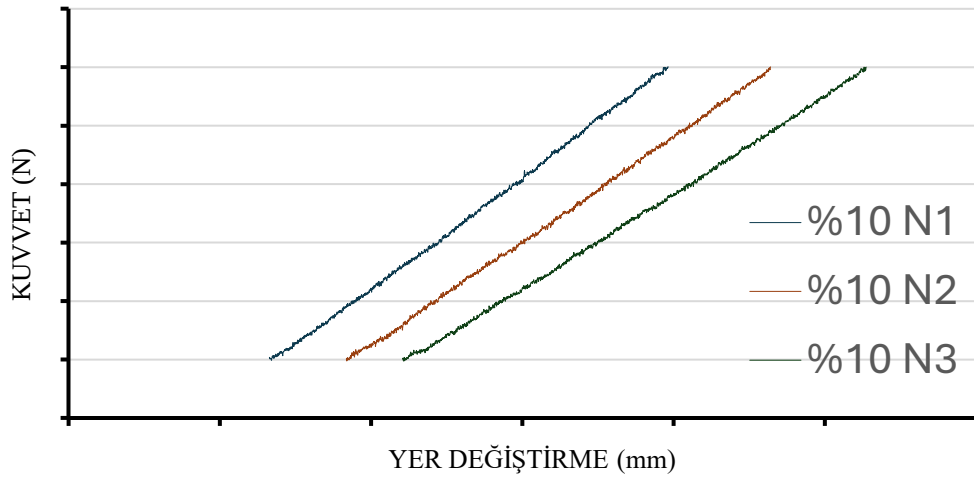
Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’te kuvvet-yer değiştirme grafiklerine uygun doğrular oluşturularak ($y = ax + b$) eğimleri hesaplanmış ve bu eğimler, eğilme rijitliğini ($E \cdot I$) temsil etmektedir. Burada E, elastiklik modülünü; I, atalet momentini ifade etmektedir. Numunelerin atalet momentleri aynı olduğu için, grafiklerden elde edilen eğimlerin elastiklik modülünü (E) gösterdiği söylenebilir. Bu doğrultuda, Tablo 5.3’te elastiklik modülü değerleri sunulmaktadır.

Elastiklik modülü (E), bir malzemenin esneklik (elastiklik) özelliğini ölçen temel bir mekanik parametredir. Young Modülü olarak da bilinen bu değer, bir malzemenin gerilme altında ne kadar şekil değiştirdiğini (deformasyon) belirler.

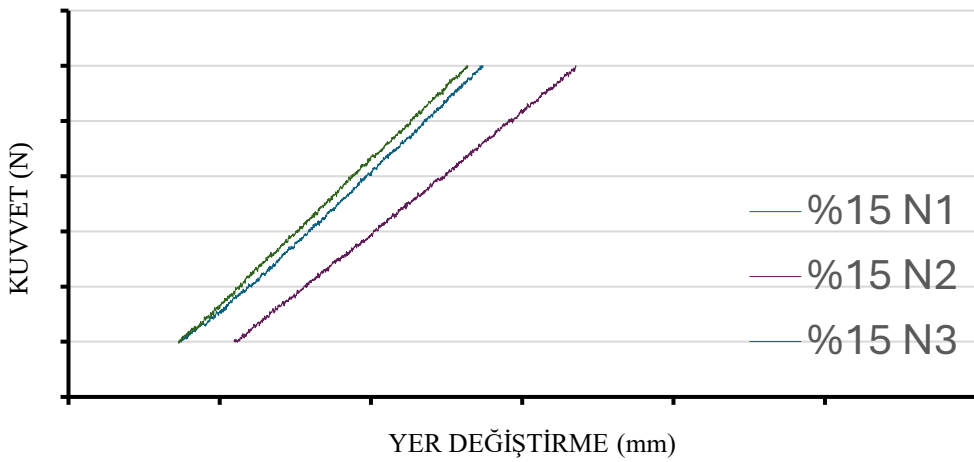
Kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin eğimleri hesaplanırken, eğriler 10 N değerinden itibaren alınmıştır. Bunun nedeni, başlangıçtaki Nonlinearity (Doğrusal Olmayan) bölgesinin etkilerini en aza indirerek sadece lineer bölgedeki verilerin kullanılmasıdır. Maksimum 60 N kuvvet seviyesine kadar yapılan hesaplamalar doğrultusunda, eğilme rijitliği ($E \cdot I$) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.22 %5 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Eğimleri



Şekil 5.23 %10 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Eğimleri



Şekil 5.24 %15 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Eğimleri

Reçineye eklenen farklı fiber katkı oranlarına ait ortalama kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç eğrilerinde Initial Nonlinearity durumu gözlemlenmiştir. Bu durum, test cihazının hassasiyeti ve bağlantı şekillerinden kaynaklanıyor olabileceğinden, yapılan değerlendirmelerde ihmal edilmiştir.

Bu doğrultuda, yukarıda sunulan grafikler, doğrusal elastik bölgeye odaklanarak oluşturulmuş ve olası sistematik hatalar minimize edilmiştir. Böylece, elde edilen veriler en doğru sonuca en yakın ve yanılma payı en düşük şekilde sunulmuştur.

Tablo 5.3'te, üç farklı numunenin ortalama elastiklik modülü değerleri sunulmuştur. Elde edilen verilere dayanarak, reçineye katılan fiber oranının artışıyla birlikte elastiklik modülünün de arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, fiber katkısının malzemenin rijitliğini artırarak daha yüksek elastiklik modülü değerlerine ulaşılmasını sağladığını göstermektedir. Fiber içeriğinin artması, malzemenin deformasyona karşı direncini artırarak mekanik performans üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır.

Tablo 5.3 Eğilmede Elastiklik Modülü Değerleri (MPa)

Eğilme Elastiklik Modülü	%0	%5	%10	%15
Numune 1	30.32	23.75	38.43	50.83
Numune 2	29.40	30.04	35.69	44.14
Numune 3	22.30	48.68	32.73	52.75
Ortalama	27.34	34.16	35.61	49.24
Standart Sapma	4.39	12.96	2.85	4.51
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	6.05	17.88	3.93	6.23
Alt Sınır	21.28	16.27	31.68	43.00
Üst Sınır	33.40	52.04	39.55	55.47

Tablo 5.4'te, elastiklik modülü serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasına ait $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları sunulmaktadır. Bu tabloya göre, P değeri %0-%5, %5-%10 serileri 0.05'ten büyük olduğundan, seriler arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. %10-%15 serilerinde P değeri 0.05'ten küçük eşit olduğundan dolayı istatistiksel olarak bu seriler arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır.

Tablo 5.4 İstatiksel Olarak Elastiklik Modülü Değerlerinin Karşılaştırılması

Varyans Analizi Ortalamalar İçin İki Örnek	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.2891	0.4435	0.0280
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.2185	0.4291	0.005
	0.2396	0.4335	0.010

Tablo 5.5'te, üç farklı numunenin ortalama eğilmede tokluk değerleri sunulmuştur. Elde edilen verilere dayanarak, (%0 ve %5) düşük katkı oranlarında tokluk değerlerinde sınırlı bir artış gözlemlenirken, %10 ve %15 katkı oranlarında belirgin bir yükselişin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, poliamid 6.6'nın belirli bir oranın üzerine çıkmasıyla birlikte malzemenin kırılma davranışında önemli bir değişim gerçekleştiğini göstermektedir. Poliamid 6.6'nın, malzeme içerisinde sünek faz oluşumunu teşvik ettiği, bu sayede çatlak yayılım mekanizmalarını değiştirdiği ve dolayısıyla kırılma tokluğunun önemli ölçüde arttığı anlaşılmaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, belirli bir katkı oranının aşılmasıyla malzeme içerisindeki yapısal düzenlemelerin kırılma mekanizmasına doğrudan etki ettiği kanaatine varılmıştır.

Tablo 5.5 Eğilmede Tokluk Değerleri (J)

Eğilmede Tokluk	%0	%5	%10	%15
Numune 1	232.35	528.33	605.19	2826.22
Numune 2	460.93	358.21	2037.73	2461.91
Numune 3	340.19	301.37	1865.58	2127.19
Ortalama	344.49	395.97	1502.83	2471.77
Standart Sapma	114.35	118.10	782.13	349.62
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	157.80	162.97	1079.34	482.47
Alt Sınır	186.69	233.00	423.49	1989.30
Üst Sınır	502.29	558.94	2582.94	2954.25

Tablo 5.6'da eğilmede tokluk serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasına ait $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları sunulmaktadır. Bu tabloya göre, P değeri %0-%5,%10-%15 serileri 0.05'ten büyük olduğundan, seriler arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. %5-%10 serilerinde P değeri 0.05'ten küçük eşit olduğundan dolayı istatistiksel olarak bu seriler arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır.

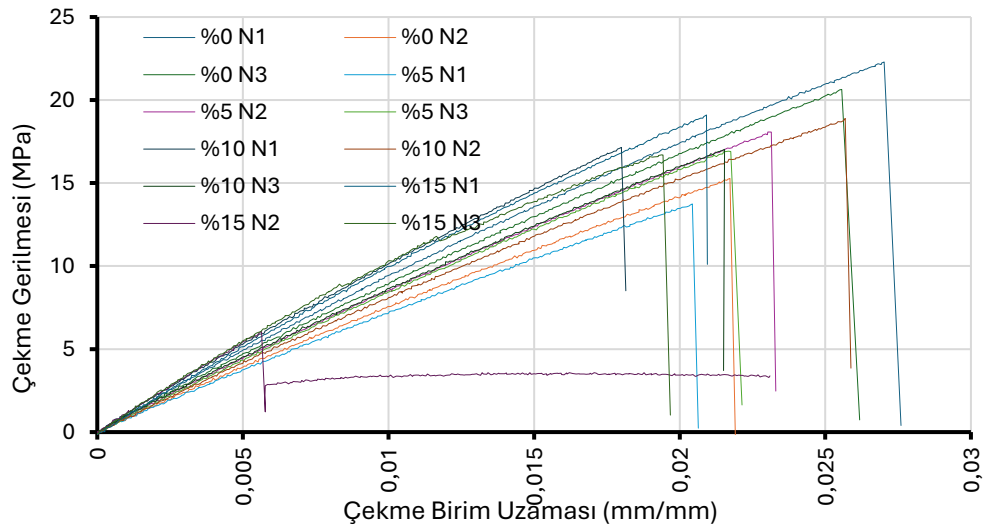
Tablo 5.6 İstatiksel Olarak Eğilmede Tokluk Değerlerinin Karşılaştırılması

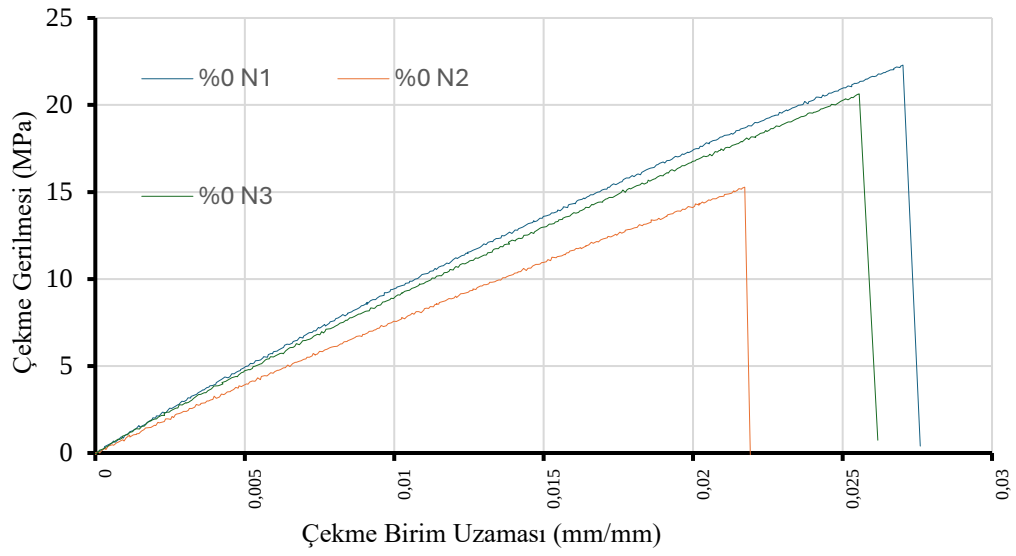
Varyans Analizi Ortalamalar İçin İki Örnek	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.3587	0.0825	0.1313
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.3081	0.0362	0.0608
	0.3081	0.0685	0.0725

5.2 Çekme Testi Sonuçları

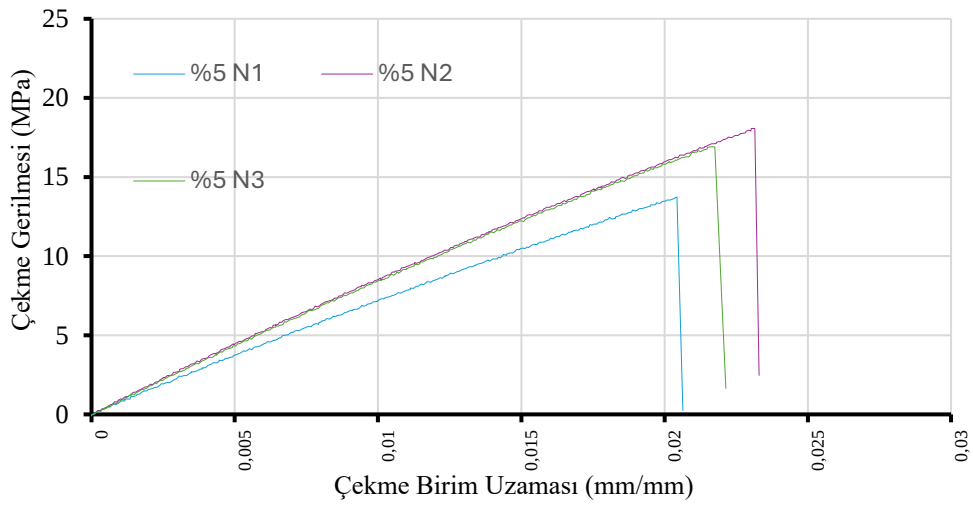
Çekme testi sonuçlarına ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.25'te sunulmuştur. Bu test, atık poliamid katkısının reçine bazlı malzemelerin çekme mukavemeti, birim şekil değiştirme ve statik tokluk özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Grafik, uygulanan gerilme ile malzemenin birim şekil değiştirme miktarı arasındaki ilişkiyi göstermekte olup, farklı katkı oranlarının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak inceleme imkânı sunmaktadır.

Şekil 5.26 ile Şekil 5.29 arasında, sırasıyla %0, %5, %10 ve %15 oranlarında atık poliamid içeren numunelerin çekme testi sonuçları sunulmuştur. Bu sonuçlar, katkı oranına bağlı olarak malzemenin çekme dayanımı, birim şekil değiştirmesi ve tokluk kapasitesindeki değişimleri ortaya koymaktadır. Böylece, poliamid katkısının malzeme davranışına etkileri detaylı olarak değerlendirilebilmektedir.

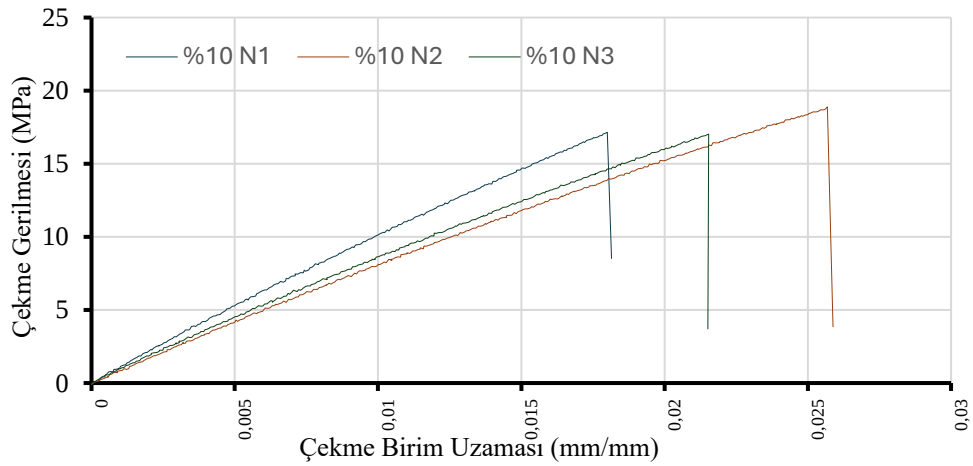
**Şekil 5.25** Çekme Testi Sonuçları



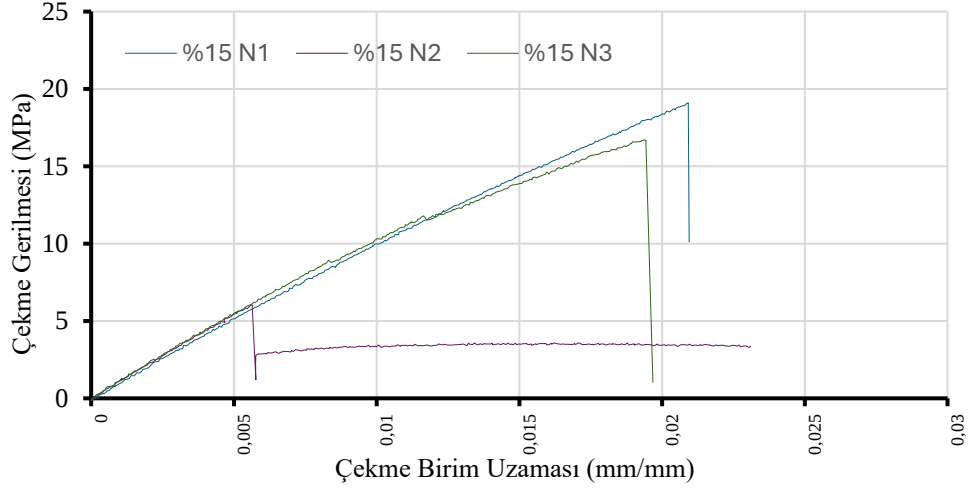
Şekil 5.26 %0 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları



Şekil 5.27 %5 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

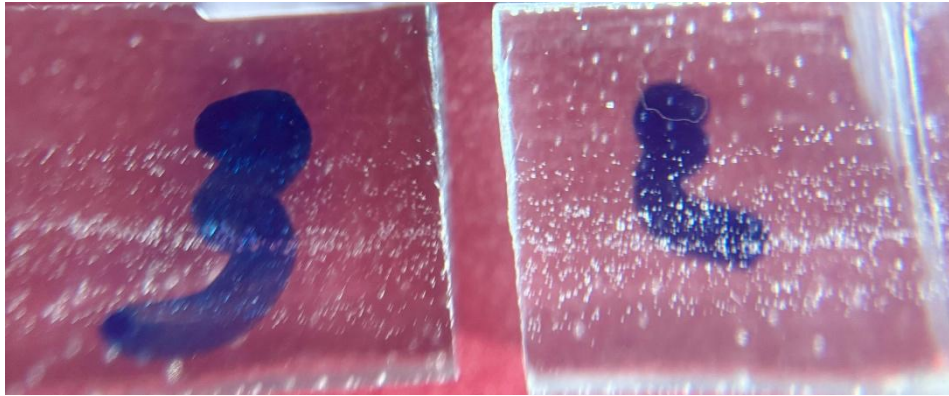


Şekil 5.28 %10 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

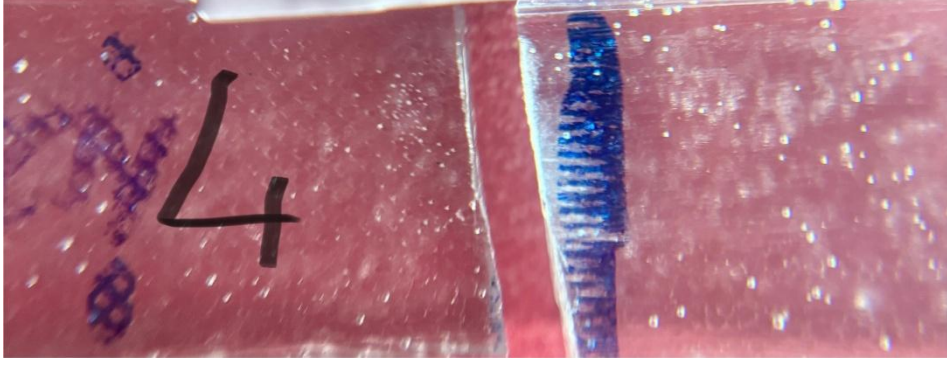


Şekil 5.29 %15 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

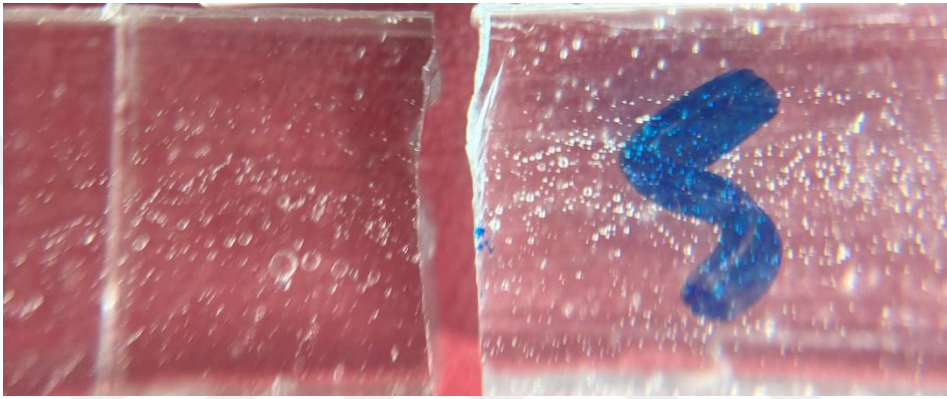
Şekil 5.30 ile Şekil 5.45 arasında, çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeyleri ve hasar görünümleri ayrıntılı olarak sunulmuştur. %5, %10 ve %15 oranlarında atık poliamid içeren numuneler ayrı ayrı değerlendirilmiş olup, katkı oranının numunelerin mekanik davranışına etkisi görsel olarak incelenmiştir. Elde edilen görüntüler, numunelerin kırılma mekanizmalarını, çatlak oluşumlarını ve deformasyon türlerini ortaya koyarak poliamid katkısının malzeme dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla sunulmuştur.



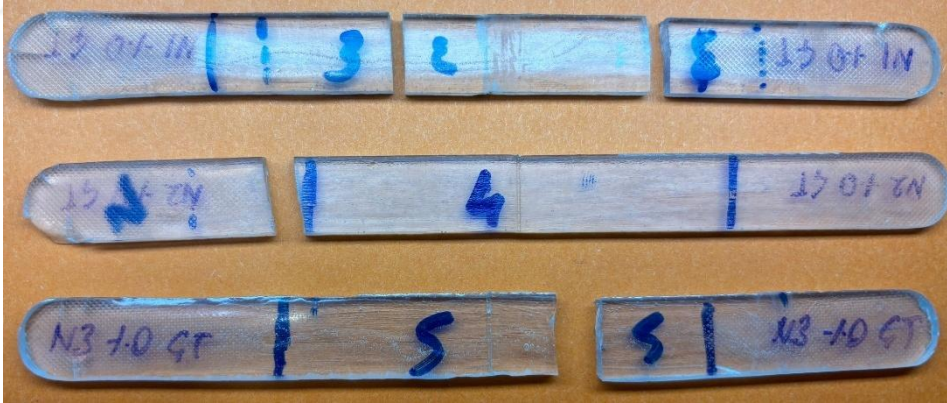
Şekil 5.30 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



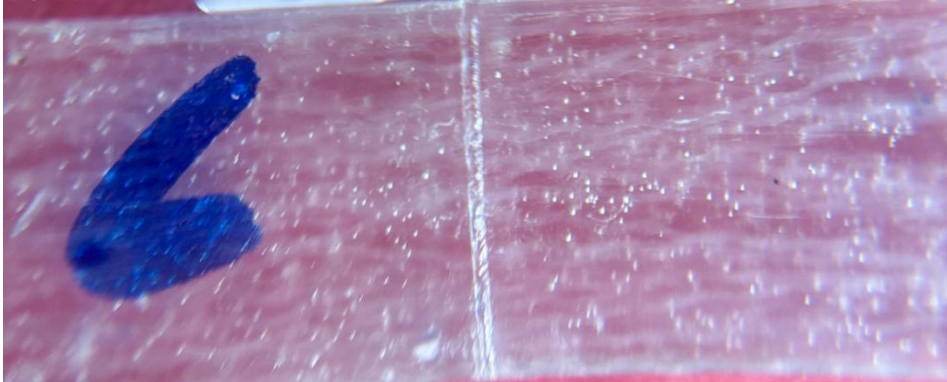
Şekil 5.31 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 2



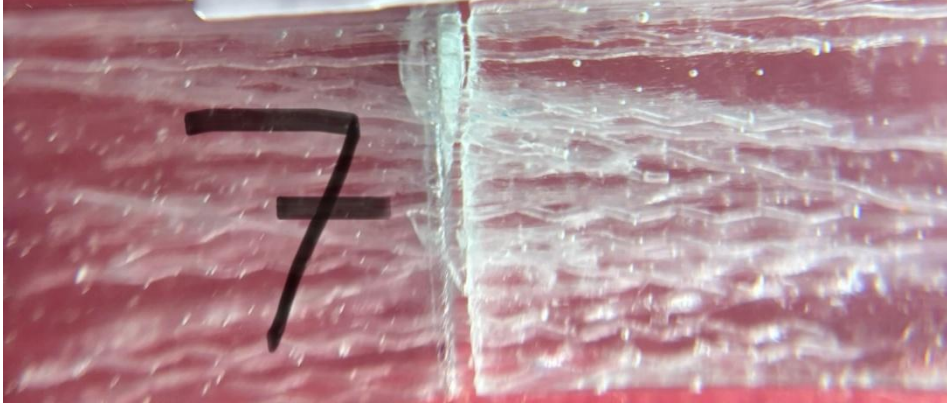
Şekil 5.32 %0 Atık Poliamid Katkılı Numune 3



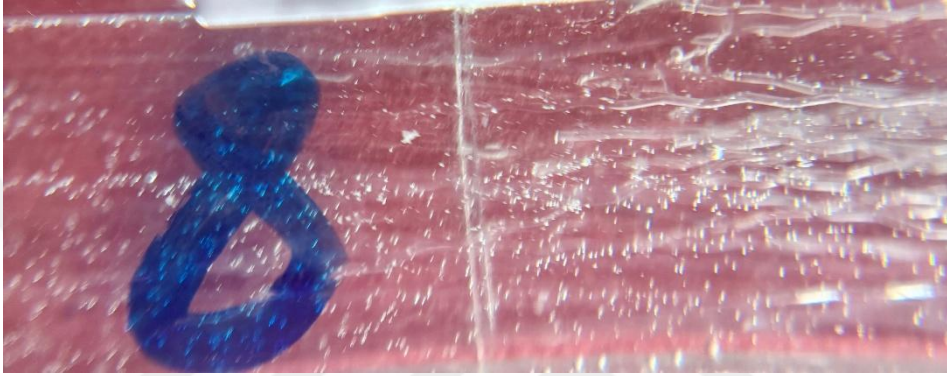
Şekil 5.33 %0 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü



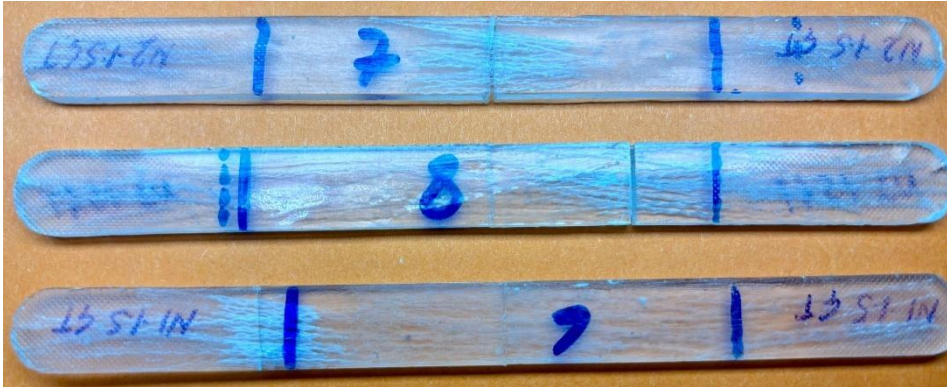
Şekil 5.34 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.35 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 2



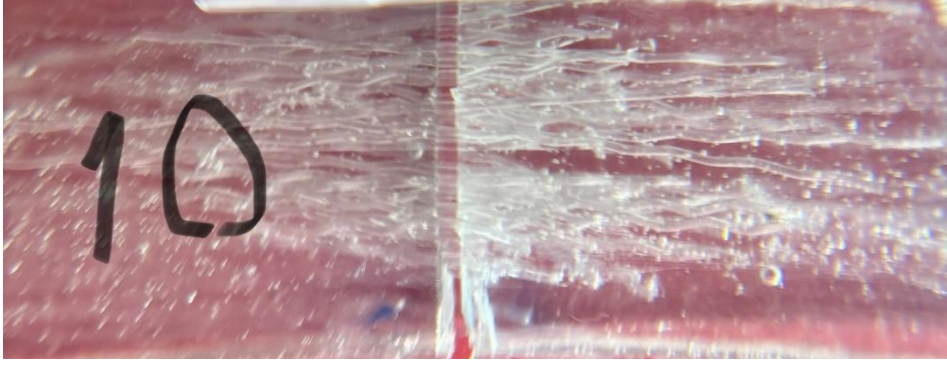
Şekil 5.36 %5 Atık Poliamid Katkılı Numune 3



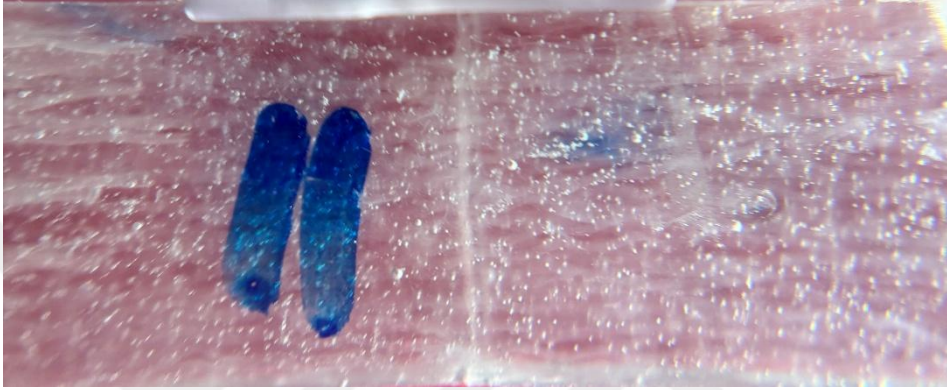
Şekil 5.37 %5 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü



Şekil 5.38 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



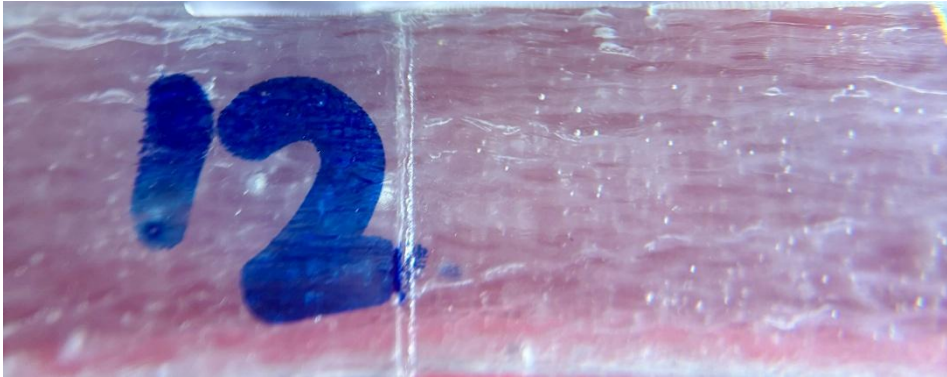
Şekil 5.39 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 2



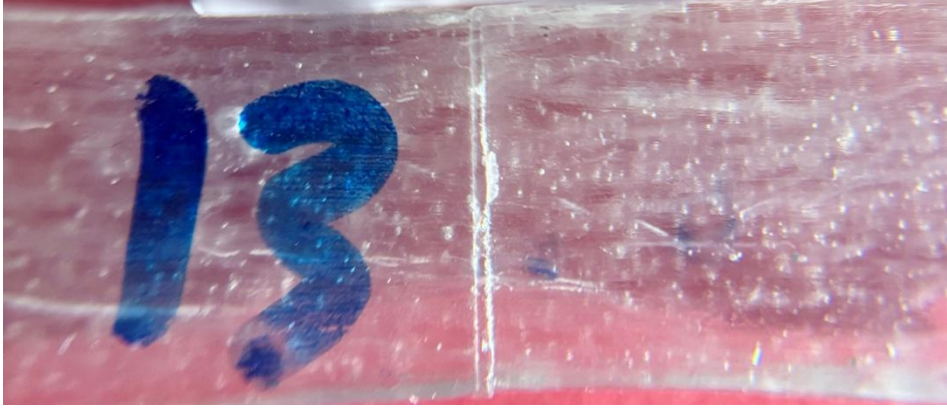
Şekil 5.40 %10 Atık Poliamid Katkılı Numune 3



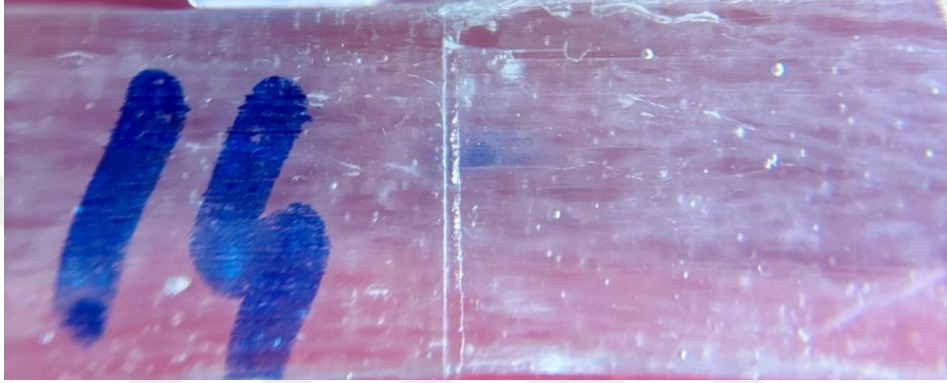
Şekil 5.41 %10 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü



Şekil 5.42 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 1



Şekil 5.43 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 2



Şekil 5.44 %15 Atık Poliamid Katkılı Numune 3



Şekil 5.45 %15 Atık Poliamid Katkılı Numunelerin Görüntüsü

Çekme mukavemeti, birim şekil değiştirme ve statik tokluk hesaplanmıştır. Şekil 5.21'deki grafikten değerler okunup aşağıdaki tablolarda gösterilmiştir.

Tablo 5.7 Çekme Testi Birim Şekil Değiştirme Değerleri

$\epsilon_{\max}$	%0	%5	%10	%15
Numune 1	0.0276	0.0204	0.0180	0.0209
Numune 2	0.0217	0.0232	0.0257	0.0231
Numune 3	0.0256	0.0218	0.0257	0.0194
Ortalama	0.0250	0.0218	0.0231	0.0211
Standart Sapma	0.0030	0.0014	0.0044	0.0019
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	0.0041	0.0019	0.0061	0.0026
Alt Sınır	0.0208	0.0198	0.0170	0.0186
Üst Sınır	0.0291	0.0237	0.0293	0.0237

Tablo 5.8'de birim şekil değiştirme serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasının $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları gösterilmiştir. Bu tabloya göre $P < 0.05$ olması durumunda serilerin istatistiksel olarak birbirinden farklı olduğu anlaşılır. Bu tabloya göre birim şekil değiştirme değerleri istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir. Katılan atık poliamid katkılarının hacimce yüzdelik değerleri birim şekil değiştirme üzerinde herhangi bir pozitif ve negatif anlamda katkı sağlamamıştır.

Tablo 5.8 İstatistiksel Olarak Birim Şekil Değiştirme Değerlerinin Karşılaştırılması

Varyans Analizi	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Ortalamalar İçin İki Örnek	0.1687	0.2786	0.2661
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.0864	0.3230	0.2560
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.0980	0.3346	0.2621

Tablo 5.9 Çekme Testi Gerilme Değerleri

σ_{max}	%0	%5	%10	%15
Numune 1	22.2900	13.7421	17.1461	19.0989
Numune 2	15.2759	18.0676	18.1892	3.2961
Numune 3	20.6386	16.9006	18.1892	16.6916
Ortalama	19.4015	16.2368	17.8415	13.0289
Standart Sapma	3.6670	2.2379	0.6023	8.5143
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	5.0605	3.0882	0.8311	11.7490
Alt Sınır	14.3410	13.1485	17.0104	1.2791
Üst Sınır	24.4620	19.3250	18.6726	24.7786

Çekme gerilmesi serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasının $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları Tablo 5.10’da sunulmuştur. Bu tabloya göre $P < 0.05$ olması durumunda serilerin istatistiksel olarak birbirinden farklı olduğu anlaşılr. Bu tabloya göre çekme gerilmesi değerleri istatistiksel olarak birbirinden farklı değildir. Katılan atık poliamid katkılarının yüzdelik değerleri çekme gerilmesi üzerinde herhangi bir pozitif ve negatif anlamda katkı sağlamamıştır. Ayrıca %15 atık poliamid katkılı 2.numunenin sonucuna göre test hatalı olduğu bariz şekilde görüldüğünden dolayı değerlendirmeye alınmamıştır.

Tablo 5.10 İstatistiksel Olarak Çekme Testi Gerilme Değerlerinin Karşılaştırılması

Varyans Analizi	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Ortalamalar İçin İki Örnek	0.2186	0.1188	0.2239
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.1356	0.1486	0.1921
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.1460	0.1769	0.2159

Tablo 5.11’de, farklı katkı oranlarına (%0, %5, %10 ve %15) sahip numunelerin ortalama çekme tokluk değerleri sunulmuştur. Elde edilen veriler, katkı oranının artmasına rağmen çekme tokluğunda beklenen artışın gerçekleşmediğini göstermektedir. Buna karşın, üç noktadan eğilme testinde atık poliamid katkı oranı arttıkça tokluk değerinde bir artış gözlemlenmiştir.

Bu durum, test yöntemleri arasındaki temel farklardan kaynaklanmaktadır. Üç noktadan eğilme testinde, numunenin iki ucu desteklenirken kuvvet merkezden

uygulanmaktadır. Bu testin standartlarına uygun olarak numunenin yatay konumda bulunması, fiber ipliklerin yük taşımada daha etkin rol oynamasına olanak sağlamaktadır. Öte yandan, çekme testinde numune alt ve üst uçlarından tutularak eksenel yönde çekilmektedir. Bu durumda fiber iplikler uygulanan kuvvet doğrultusunda hizalandığından, yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artış veya azalış gözlemlenmemiştir.

Sonuç olarak, çekme ve eğilme testlerindeki mekanik yükleme farklılıkları nedeniyle poliamid katkısının tokluk üzerindeki etkisinin her iki testte aynı şekilde gözlemlenmediği söylenebilir.

Tablo 5.11 Çekme Testi Statik Tokluk Değerleri (J/mm³)

Statik Tokluk	%0	%5	%10	%15
Numune 1	0.3362	0.1494	0.1638	0.2111
Numune 2	0.3368	0.1988	0.1914	0.0737
Numune 3	0.2092	0.2000	0.1938	0.1864
Ortalama	0.2941	0.1827	0.1830	0.1571
Standart Sapma	0.0735	0.0289	0.0167	0.0732
Chauvenet Kriterine Göre Değerlendirme				
Chauvenet	0.1014	0.0398	0.0230	0.1011
Alt Sınır	0.1926	0.1429	0.1600	0.0560
Üst Sınır	0.3955	0.2226	0.2060	0.2581

Çekme testi tokluk serilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasının $P(T \leq t)$ tek-uçlu sonuçları Tablo 5.12’de sunulmuştur. Bu tabloya göre $P < 0.05$ olması durumunda serilerin istatistiksel olarak birbirinden farklı olduğu anlaşılr. Bu tabloya göre çekme testi tokluk değerleri istatistiksel olarak birbirinden %0-%5 serileri birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer seriler incelendiğinde %5-%10, %10-%15 serileri istatistiksel anlamda birbirinden farklı olmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.12 İstatistiksel Olarak Çekme Testi Statik Tokluk Karşılaştırılması

Varyans Analizi	%0-%5	%5-%10	%10-%15
Ortalamalar İçin İki Örnek	0.0851	0.4866	0.3232
Eşit Varyanslar İçin İki Örnek	0.0355	0.4948	0.2910
Farklı Varyanslar Varsayarak İki Örnek	0.046	0.4949	0.3052

Bu çalışmada, kompozisyon ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla ikinci dereceden regresyon modeli oluşturulmuştur. Model kapsamında Eğilme Dayanımı, Eğilme Elastiklik Modülü, Çekme Birim Şekil Değişirme, Çekme Dayanımı, Çekme Tokluk ve Eğilme Tokluk değişkenleri için A, B ve C katsayıları hesaplanmıştır. Oluşturulan modelin güvenilirliği ve açıklayıcılığı, determinasyon katsayısı (R^2) kullanılarak değerlendirilmiştir.

Yapılan mekanik testler sonucunda elde edilen R^2 (Determinasyon Katsayısı) değerleri Tablo 5.13'te gösterilmiştir. Regresyon modellerinin bağımlı değişken üzerindeki açıklama gücünü ortaya koymaktadır. Eğilme gerilme değerleri ($R^2 = 0.969$) ve eğilme elastiklik modülü ($R^2 = 0.939$) sonuçları, sırasıyla gibi yüksek açıklama oranları ile modellerin güçlü bir uyum sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin büyük ölçüde başarıyla temsil edildiğini ortaya koymaktadır. Çekme birim şekil değişirme ($R^2 = 0.800$) ve çekme gerilmesi ($R^2 = 0.719$) testlerinde ise açıklama gücü daha düşük olup sırasıyla olarak hesaplanmıştır. Bu durum, modelin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ve açıklanamayan varyansın görece yüksek olduğunu göstermektedir. Özellikle çekme gerilmesi testinde (%28.1 oranında açıklanamayan varyans) modelin ek değişkenlerle veya farklı regresyon teknikleri ile güçlendirilmesi önerilmektedir. Çekme tokluk değerleri ($R^2 = 0.915$) açıklama oranı ile yüksek bir uyum sergilerken, eğilme tokluk değerleri ($R^2 = 0.999$) neredeyse tam bir uyum göstermektedir.

Tablo 5.13. Testler için hesaplanan determinasyon katsayıları

KATSAYILAR	EĞİLME DAYANIMI	EĞİLME ELASTİKLİK MODÜLÜ	ÇEKME BİRİM ŞEKİL DEĞİŞTİRME	ÇEKME DAYANIM	ÇEKME TOKLUK	EĞİLME TOKLUK
A	0.2591	0.0679	9.7504	-0.0164	0.0008	0.0009
B	-2.7254	0.3233	-0.0003	-0.1029	-0.0208	0.9999
C	72.9016	28.2157	0.0244	18.8418	0.2869	0.0005
R^2	0.9691	0.9392	0.8002	0.7190	0.9151	0.9999

Bu çalışmada, üç farklı amaç fonksiyonu tanımlanmış ve ilk iki amaç fonksiyonu için üçer farklı senaryo oluşturularak analiz edilmiştir. Her bir senaryo için belirlenen amaç fonksiyonlarının doğruluk seviyeleri, R^2 katsayıları hesaplanarak değerlendirilmiştir. Elde edilen R^2 değerleri, fonksiyonların veri setiyle uyumluluğunu ve modelleme doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, her bir amaç fonksiyonunun farklı uygulama alanlarına yönelik uygunluğu incelenmiş ve potansiyel kullanım alanları belirlenmiştir. Bu doğrultuda, amaç fonksiyonlarının hangi makine ve ekipmanlarında etkin şekilde uygulanabileceğine dair öneriler sunulmuştur. Çalışma, optimizasyon süreçlerinde amaç fonksiyonlarının seçiminin önemini vurgulamakta ve farklı senaryolara göre elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizini içermektedir.

Dayanımın maksimize edilmesi için oluşturulan ve Denklem 5.1 ile verilen amaç fonksiyonunda malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla belirlenen farklı ağırlık katsayıları (W_1 , W_2 , W_3) kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Eğilme dayanımı, eğilmede elastiklik modülü ve eğilmede tokluk kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda, katkı oranlarının mekanik performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tablo 5.14’de amaç fonksiyonu 1 için sonuçlar sunulmuştur.

$$F_1 = W_1(\text{Eğilme dayanımı}) + W_2(\text{Eğilmede elastiklik modülü}) + W_3(\text{Eğilmede tokluk}) \quad \text{Denklem 5.1}$$

Eğilme dayanımının maksimize edilmesine yönelik optimizasyon senaryosunda $W_1 = 0.5$, $W_2 = 0.3$ ve $W_3 = 0.2$ olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda farklı katkı oranlarına bağlı olarak elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 2.2’de verilmiştir: Bu veriler doğrultusunda, katkı oranı arttıkça eğilme dayanımında önemli bir artış gözlemlenmiştir. %0 katkıya kıyasla %15 katkı oranında yaklaşık 4,87 kat artış sağlanmıştır. Bu durum, katkı malzemesinin eğilme dayanımına pozitif yönde etkisi olduğunu göstermektedir.

Darbe ve kırılma dayanımının maksimize edilmesine yönelik optimizasyon senaryosunda $W_1 = 0.3$, $W_2 = 0.2$ ve $W_3 = 0.5$ olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 2.2’de verilmiştir. Darbe ve kırılma dayanımı açısından katkı oranının etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. %0 katkıya kıyasla %15 katkı oranında yaklaşık 6,39 kat artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar, katkı malzemesinin kırılmaya karşı dayanımı önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Tüm mekanik özellikler dikkate alınarak yapılan genel optimizasyonda, ağırlık katsayıları $W_1 = 0.4$, $W_2 = 0.3$ ve $W_3 = 0.3$ olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 2.2’de verilmiştir. Genel dengeli optimizasyon

senaryosunda da katkı oranı arttıkça dayanım değerlerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. %0 katkı oranına kıyasla %15 katkı oranında 5,64 kat artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı açısından dengeli bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, her üç optimizasyon senaryosunda da katkı oranı arttıkça malzemenin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir. Özellikle darbe ve kırılma dayanımı optimizasyonunda en yüksek artış yüzdesi gözlemlenmiştir. Genel dengeli optimizasyon senaryosu ise eğilme dayanımı ve darbe dayanımını dengeleyerek optimum bir performans sunmaktadır.

Sonuç olarak, %15 katkı oranı her üç senaryoda da en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği seviye olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, katkı malzemesinin mekanik performans üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır ve ilerleyen çalışmalarda katkı oranının farklı malzemelerle olan etkileşiminin daha detaylı araştırılmasını gerektirmektedir.

Tablo 5.14. Amaç Fonksiyonu 1'in Sonuçları

SENARYO	Eğilme Dayanımı(W1)	Eğilmede Elastiklik Modülü (W2)	Eğilmede Tokluk (W3)	%0	%5	%10	%15
Eğilme Dayanımı	0.5	0.3	0.2	113.850	123.147	345.937	554.661
Darbe ve Kırılma Dayanımı	0.3	0.2	0.5	199.364	225.202	779.350	1273.054
Genel Dengeli Optimizasyon	0.4	0.3	0.3	140.417	156.219	489.283	792.731

Tablo 5.15'te, amaç fonksiyonu 1'in senaryolarının sonuçlarına göre oluşturulan ikinci dereceden polinomsal grafiklerin R^2 değerleri ile İmaş Makine Sanayi A.Ş.'de kullanılması planlanan makine ve ekipmanlar gösterilmektedir. R^2 değerleri incelendiğinde modelin yüksek doğrulukla veri setine uyum sağladığını göstermektedir.

Tablo 5.15. R² Değerleri ve Kullanılabilirlik Alanları

SENARYO	R ² Değerleri	Kullanılabilirlik Alanları
Eğilme Dayanımı	0.9806	Vals sağ ve sol kapaklarında
Darbe ve Kırılma Dayanımı	0.9779	Çekiçli değirmen muhafaza kapağı
Genel Dengeli Optimizasyon	0.9792	Flake vals numune alma kapağı

Genel mekanik performansın artırılması için oluşturulan ve Denklem 2.3 ile verilen amaç fonksiyonunda malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla belirlenen farklı ağırlık katsayıları (W4, W5, W6, W7) kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Eğilme dayanımı, çekme dayanımı, eğilmede tokluk ve çekmede tokluk kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda, katkı oranlarının mekanik performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tablo 5.16’da amaç fonksiyonu 2 için sonuçlar sunulmuştur.

$$F_2 = W4(\text{Eğilme dayanımı}) + W5(\text{Çekme dayanımı}) + W6(\text{Eğilmede tokluk}) + W7(\text{Çekmede tokluk})$$

Denklem 5.2

Eğilme dayanımının maksimize edilmesine yönelik optimizasyon senaryosunda W4 = 0.4, W5 = 0.2, W6 = 0.3 ve W7 = 0.1 olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda farklı katkı oranlarına bağlı olarak elde edilen sonuçlar Tablo 6.4’te verilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, katkı oranı arttıkça eğilme dayanımında önemli bir artış gözlemlenmiştir. %0 katkıya kıyasla %15 katkı oranında yaklaşık 5,73 kat artış sağlanmıştır. Bu durum, katkı malzemesinin eğilme dayanımına pozitif yönde etkisi olduğunu göstermektedir.

Çekme dayanımının maksimize edilmesine yönelik optimizasyon senaryosunda W4 = 0.2, W5 = 0.4, W6 = 0.2 ve W7 = 0.2 olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı açısından katkı oranının etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. %0 katkıya kıyasla %15 katkı oranında yaklaşık 5,68 kat artış sağlanmıştır. Bu sonuçlar, katkı malzemesinin çekme dayanımı üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir.

Tüm mekanik özellikler dikkate alınarak yapılan genel optimizasyonda, ağırlık katsayıları W4 = 0.3, W5 = 0.3, W6 = 0.3 ve W7 = 0.1 olarak belirlenmiştir. Genel dengeli optimizasyon senaryosunda da katkı oranı arttıkça dayanım değerlerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir. %0 katkı oranına kıyasla %15 katkı oranında 5,91 kat artış

sağlanmıştır. Bu sonuçlar, eğilme ve çekme dayanımı açısından dengeli bir iyileşme sağlandığını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, her üç optimizasyon senaryosunda da katkı oranı arttıkça malzemenin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir. Eğilme ve çekme dayanımında gözlenen artışlar, katkı malzemesinin yapısal mukavemeti artırıcı etkisini ortaya koymaktadır. Genel dengeli optimizasyon senaryosu, mekanik özellikler arasında optimum bir denge sağlayarak hem eğilme hem çekme dayanımını geliştirmektedir.

Sonuç olarak, %15 katkı oranı her üç senaryoda da en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği seviye olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, katkı malzemesinin mekanik performans üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır ve ilerleyen çalışmalarda katkı oranının farklı malzemelerle olan etkileşiminin daha detaylı araştırılmasını gerektirmektedir.

Tablo 5.16. Amaç Fonksiyonu 2'nin Sonuçları

SENARYO	Eğilme Dayanımı	Çekme Dayanımı	Eğilmede Tokluk	Çekmede Tokluk	%0	%5	%10	%15
	(W4)	(W5)	(W6)	(W7)				
Eğilme Dayanımı	0.4	0.2	0.3	0.1	136.1	149.2	482.1	780.5
Çekme Dayanımı	0.2	0.4	0.2	0.2	91.1	99.3	321.6	517.8
Genel Dengeli Optimizasyon	0.3	0.3	0.3	0.1	130.8	144.0	477.0	772.7

Tablo 5.17'de, amaç fonksiyonu 2'nin senaryolarının sonuçlarına göre oluşturulan ikinci dereceden polinomsal grafiklerin R^2 değerleri ile İmaş Makine Sanayi A.Ş.'de kullanılması planlanan makine ve ekipmanlar gösterilmektedir. R^2 değerleri incelendiğinde modelin yüksek doğrulukla veri setine uyum sağladığını göstermektedir

Tablo 5.17. R² Değerleri ve Kullanılabilirlik Alanları

SENARYO	R ² Değerleri	Kullanılabilirlik Alanları
Eğilme Dayanımı	0.9778	İrmik sasörü kasasında
Çekme Dayanımı	0.9768	Randıman kantarı loadcell bağlantısı
Genel Dengeli Optimizasyon	0.9774	Kare elek askı çubuklukları

Kare elek kasaları içerisinde yer alan ve eleklerin temizlenmesi amacıyla kullanılan fırçalı temizleme sisteminde yer alan yıldız bileşenleri için en uygun mekanik özelliklere sahip reçine kompozisyonunun belirlenmesi, Denklem 6.3 ile ifade edilmektedir. Denklem 5.3 ile verilen amaç fonksiyonunda en uygun malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla belirlenen farklı ağırlık katsayıları (W8, W9, W10, W11) kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Eğilme elastiklik modülü, eğilmede tokluk, eğilme dayanımı ve çekmede tokluk kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda, katkı oranlarının mekanik performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

$$F_3 = -W8(\text{Eğilme elastiklik modülü} - \text{Elastiklik modülü optimum değer})^2 - W9(\text{Eğilmede tokluk} - \text{Eğilmede tokluk optimum değer})^2 + W10(\text{Eğilme dayanımı}) + W11(\text{Çekme dayanımı}) \quad \text{Denklem 5.3}$$

Kare elek kasaları içerisinde yer alan ve eleklerin temizlenmesi amacıyla kullanılan fırçalı temizleme sisteminde yer alan yıldız bileşenleri için en uygun mekanik özelliklere sahip reçine kompozisyonunun belirlenmesi için ağırlık katsayıları W8 = 0.1, W9 = 0.0001, W10 = 0.3 ve W11 = 0.2 olarak belirlenmiştir. Buna göre oluşturulan 3.dereceden polinomsal grafiğe göre R² katsayısı 1 olarak bulunmuştur. Yapılan çözümler sonucunda amaç fonksiyonu 3 için %6.5 atık poliamid katkılı reçine bu kriterleri sağlayan en uygun kompozisyon oranı olarak belirlenmiştir. Bu değerden daha fazla katkı oranı eklendiğinde eğilme tokluğu ve çekme dayanımı aşırı düştüğü için malzeme performansında bozulmalar gözlemlenebileceği öngörülmüştür

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, fabrika atığı olan poliamid ipliklerin katkısı ile yeni bir polimer matris kompoziti geliştirilmiş ve bu kompozitin mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, atık malzemelerin değerlendirilmesi yoluyla çevre dostu ve ekonomik açıdan avantajlı yeni malzemeler üretmektir. Polimer matris kompozitin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testi, üç noktadan eğilme testi ve sıyrılma testi gibi deneysel yöntemler uygulanmıştır. Kompozit hazırlanırken, farklı boylardaki ipliklerin kullanımı ile bu değişkenlerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen veriler, Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) kullanılarak optimize edilmiştir ve deneysel parametrelerin malzemenin mekanik performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, atık poliamid katkısının reçineye mekanik özellikler açısından anlamlı katkılar sağladığını ve optimize edilmiş formülasyonların endüstriyel uygulamalar için güçlü adaylar olduğunu göstermektedir. Sonuçlar şu şekilde özetlenebilir,

- Sıyrılma testine ilişkin sonuçlar, 5 mm ve 10 mm batma derinliklerinde kenar etkilerinin baskın olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, 15 mm batma derinliğinde sıyrılma testi sonuçlarının daha tutarlı ve güvenilir olduğu gözlemlenmiştir.
- Kritik fiber hacim oranı, yapılan hesaplamalarla %44 olarak belirlenmiş olup, minimum fiber oranı ise %3,6 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara dayanarak, numuneye hacimce %44 oranına kadar fiber eklenebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, kullanılan fiberin fiziksel özellikleri (özellikle tırtıklı yapısı) göz önünde bulundurularak, kompozite hacimce maksimum %15 oranında fiber eklenmiştir.
- Fiber hacim oranı ile kompozit mukavemetinin değişimi incelendiğinde, matrisin gerilme değeri, kritik fiber hacim oranındaki gerilme değeriyle örtüşmektedir. Fiber oranı arttıkça, matrisin gerilme değerinin düşmesi gerektiği, dolayısıyla fiber oranı yükseldikçe gerilme değerinin kritik fiber oranındaki değere yaklaşması gerektiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, matrisin gerilme değeri %5 ve %10 fiber katkılı kompozitlere kıyasla daha yüksek iken, kritik fiber oranı olan %44'ün altında (%15) bu değer düşüğü

gözlemlenmiştir. Bu durum, fiber eklenmesinin matrisin büzülmesine yol açarak ilave bir sürtünme oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.

- Üç noktadan eğilme testine dayanan elastiklik modülü, reçineye katılan fiber oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Elastiklik modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirme yeteneğini ölçen bir parametre olarak, bu sonuçların istatistiksel olarak birbirinden anlamlı şekilde farklı olduğu belirlenmiştir.
- Fiber katkı oranlarının birim şekil değiştirme miktarları üzerinde herhangi bir katkısı olmadığı gözlemlenmiştir.
- Fiber katkı oranları gerilme değerleri üzerinde herhangi bir katkısı olmamıştır.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen atık poliamid katkılı reçine kompozitlerinin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmak, mekanik performansını iyileştirmek ve optimizasyon sürecini geliştirmek için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

6.2.1. Endüstriyel Uygulamalar İçin Öneriler

Atık poliamid katkılı reçineler, hafiflik, yüksek mekanik dayanım ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajları nedeniyle çeşitli mühendislik ve sanayi uygulamalarında değerlendirilebilir.

Otomotiv Sektörü

- Hafif yapısı ve yüksek mukavemeti nedeniyle, taşıtlarda yapısal ve yarı yapısal bileşenlerde kullanılabilir.
- Kaput altı parçalar, tampon iç iskeletleri, iç trim parçaları ve motor kaplamalarında metal yerine kullanılabilir.

İnşaat Sektörü

- Yüksek mukavemeti ve kimyasal dayanımı sayesinde kompozit paneller, yapısal profiller ve kaplama malzemelerinde kullanılabilir.

Ambalaj Sektörü

- Darbeye dayanıklı ve hafif ambalaj malzemesi olarak değerlendirilebilir.
- Gıda ambalajları ve koruyucu kılıflar için özel kaplamalarla uyumlu hale getirilebilir.

- Geri dönüştürülebilir olması, sürdürülebilir ambalaj çözümlerine katkı sağlayabilir.

Savunma ve Havacılık Sektörü

- Hafifliği ve yüksek mekanik dayanımı sayesinde insansız hava araçları (İHA) ve diğer hava taşıtlarında yapısal bileşen olarak kullanılabilir.

Atık poliamidlerin geri dönüştürülerek farklı sanayi sektörlerinde kullanılması, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir üretim süreci sunmakta ve döngüsel ekonomi anlayışına katkı sağlamaktadır.

6.2.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular, atık poliamid katkılı reçinelerin geliştirilmesi ve optimizasyonu açısından önemli veriler sunmuştur. Ancak, daha kapsamlı araştırmalar yapılarak malzeme performansı artırılabilir ve yeni uygulama alanları oluşturulabilir.

Malzeme Geliştirmeye Yönelik Öneriler

- Farklı poliamid türleri (PA6, PA12 vb.) test edilerek optimum katkı oranı belirlenmelidir.
- Kompozitin kimyasal direnç özellikleri incelenerek, asidik ve bazik ortamlarda dayanıklılığı araştırılmalıdır.
- Poliamid liflerin yüzey modifikasyonu (plazma işlemi, kimyasal kaplama) yapılarak lif-matris bağlanma mukavemeti artırılmalıdır.
- Nano katkılar (grafen, karbon nanotüp vb.) eklenerek mekanik ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi sağlanmalıdır.

Deneyisel Çalışmalar ve Testler İçin Öneriler

- Kompozitin uzun vadeli performansını değerlendirmek için darbe mukavemeti, yorulma dayanımı ve sıcaklık dayanımı testleri uygulanmalıdır.
- Termal kararlılığı artırmak için yanmazlık testleri gerçekleştirilmelidir.
- Çeşitli üretim teknikleri (enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, el yatırması) denenerek en uygun üretim yöntemi belirlenmelidir.
- Deneylerin tekrarlanabilirliği artırılarak, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalara yönelik veri setleri oluşturulmalıdır.

Bu öneriler doğrultusunda, atık poliamid katkılı reçinelerin mekanik performansı artırılarak daha geniş uygulama alanlarına yayılması sağlanabilir.

6.2.3. Optimizasyon Çalışmalarına Yönelik Öneriler

Bu çalışmada istatistiksel değerlendirme ve optimizasyonu kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmış olup, kompozitin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik daha ileri optimizasyon çalışmaları önerilmektedir.

Alternatif Optimizasyon Yöntemleri

- Genetik Algoritmalar (GA) ve Yapay Sinir Ağları (ANN) gibi yapay zekâ tabanlı modelleme teknikleri kullanılarak mekanik test sonuçlarının daha hassas tahmini sağlanabilir.
- Taguchi Metodu kullanılarak deney tasarımları optimize edilebilir ve en uygun poliamid oranı belirlenebilir.
- Deneylerin tekrarlanabilirliği artırılarak, daha büyük veri setleriyle regresyon modelleri oluşturulabilir.

İstatistiksel Analiz ve Veri Bilimi Uygulamaları

- Büyük veri analizi ile kompozitin mekanik özelliklerini daha iyi anlamak için veri madenciliği teknikleri kullanılabilir.
- Makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak, çekme ve eğilme mukavemetini tahmin eden modeller geliştirilebilir.
- Deneysel sonuçların doğruluğunu artırmak için daha fazla örneklem içeren geniş çaplı testler gerçekleştirilmelidir.

Bu optimizasyon çalışmalarının uygulanmasıyla, atık poliamid katkılı reçinelerin üretim süreçleri iyileştirilerek sanayide daha geniş bir kullanım alanına yayılması sağlanabilir.

6.3. Genel Değerlendirme

Bu çalışma, atık poliamid katkılı reçinelerin geri dönüştürülerek sanayiye kazandırılması konusunda önemli bilimsel bulgular ortaya koymuştur.

- Geliştirilen malzeme, mekanik dayanım ve çevresel sürdürülebilirlik açısından umut vadeden sonuçlar sunmaktadır.
- İstatistiksel analizler ve optimizasyon yöntemleri ile kompozit malzemenin mekanik özellikleri başarılı bir şekilde iyileştirilmiştir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarla, farklı polimer matris malzemeleri ve poliamid türleri kullanılarak daha geniş kapsamlı araştırmalar yapılabilir.

- Bu sayede, geri dönüştürülmüş poliamid katkılı kompozitlerin sanayiye entegrasyonu daha verimli hale getirilebilir.

Geri dönüştürülmüş poliamid katkılı reçinelerin sanayide hafif, dayanıklı ve sürdürülebilir bir alternatif malzeme olarak kullanımı, çevresel etkileri azaltarak ekonomik ve ekolojik faydalar sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Banga JR, Balsa-Canto E, Moles CG, Alonso AA. 2003. Improving food processing using modern optimization methods, *Trends Food Sci & Tech*, 14: 131-144.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P. (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61.
- Çelikçi, H. (2013), Karbon Elyaf Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilenin Isıl ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yalova.
- Doğu, S., Eva esaslı elastomer ile uyumlaştırılmış ve silika nanotüp katkı polipropilen/termoplastik elastomer alaşım nanokompozitlerin üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi*; 2020. <https://tez.yok.gov.tr/>
- Ekici, R. (2004), Alüminyum Eşesli SİC Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.
- Erdoğan, F. (2007). Yükseltilmiş d-optimal dizayn yöntemi kullanılarak mühendislik dizaynlarında etkinliğin geliştirilmesi: sentetik jet dizayn optimizasyon çalışması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 3(1), 51-61. Erişim adresi: <http://search.trdizin.gov.tr/>
- Eren İ. 2004. Patateslerin osmotik dehidrasyonunun “response surface” metodu kullanılarak optimizasyonu, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, İzmir, Türkiye.
- Erkal, Ö. G. (2015), Karbon Epoksi Kompozitin Camsı Geçiş Sıcaklığı Üzerine Farklı Kürleşme Çevrimlerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Fıçııcı, F., ve Ayparçası, Z. (2014), %30 Cam Fiber Takviyeli Polipitilamit (PPA) Matrisli Kompozit Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi, 5. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (Utis 2014)*, s. 473-481, Bursa.
- Grilo, T., Paulo, R., Silva, C. ve Davim, J. (2013), Experimental Delamination Analyses of Cfrps Using Different Drill Geometries, *Composites: Part B*, cilt 45, s. 1344-1350.
- Güney, Z. H. (2011), Enjeksiyonda Şekillendirilen Termoplastik Malzemelerde Farklı Dolguların Birleşme İzine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Kakar, M.,N., 2019, Bazalt Elyafların Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek lisans tezi.

- Koruvatan, A. (2008), Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Cıvatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Kocabaş, GB. Cam elyaf takviyeli PA 6.6'nın enjeksiyon prosesinin simülasyon yoluyla analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Çorum: Hitit Üniversitesi*; 2014. <https://tez.yok.gov.tr>
- Kuram, E. (2016), Micro-Machinability of Injection Molded Polyamide 6 Polymer and Glass-Fiber Reinforced Polyamide 6 Composite, *Composites Part B*, cilt 88, s. 85-100.
- Martin E. Rogers, Timothy E. Long, 2003, Synthetic Methods in Step-Growth Polymers, John Wiley & Sons INC.
- Mazumdar, S. K. (2002), Composites Manufacturing Materials, *Product and Process Engineering*, United States of America: Crc Press, s. 24-25.
- Melvin I. Kohan, 1995, Nylon Plastics Handbook, Hanser Publishers.
- M. K. Singh, R. Kitey, Polym. Compos, 2022, 43(11), 8030.
- Myers R.H., Montgomery D.C., 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments., New York: John Wiley.
- Özer, H. (2015), Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneyisel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Özgür Ekincioglu, 2003, Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı–Bir Optimum Tasarım, *İTÜ Fen bilimleri enstitüsü*, Sika Teknik Bülten, 10-11.
- Palanikumar, K., Srinivasan, T., Rajagopal, K. ve Latha, B. (2016), Thrust Force Analysis in Drilling Glass Fiber Reinforced/Polypropylene (GFR/PP) Composites. *Materials and Manufacturing Processes*, cilt 31, s. 581-586.
- Panneerselvam, T. ve Raghuraman, S. (2015), Optimization of Drilling Parameters For Delamination Associated with Pre-Drill in Chopped Strand Mat Glass Fibre Reinforced Polymeric Material, *Pertanika Journal Science and Technology*, cilt 23, s. 61-72.
- Phadnis, V. A., Makhdum, F., Roy, A. ve Silberschmidt, V. (2013), Drilling in Carbon/Epoxy Composites: Experimental Investigations and Finite Element Implementation, *Composites: Part A*, cilt 47, s. 41-51.
- P.A. Smith, J.A Yeomans, Materials And Engineering – Vol. II Benefits of Elyaf and Particulate Reinforcement, *Encyclopedia of Life Supports Systems*, EOLSS. 85
- Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D.H. and Moczko, A., 'Fracture Properties and Acoustic Emission Response of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre Reinforced Concrete',

Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France, pp.491-500, 2000.

- Ramesh, M., Palanikumar, K. ve Reddy, K. (2014), Experimental Investigation and Analysis of Machining Characteristics in Drilling Hybrid Glass-Sisal-Jute Fiber Reinforced Polymer Composites, 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, *Design and Research Conference*, s. 461-1, 461-6.
- Rubio, J. C., Silva, L., Leite, W., Panzera, T., Filho, S. ve Davim, J. (2013), Investigations on the Drilling Process of Unreinforced and Reinforced Polyamides Using Taguchi Method, *Composites: Part B*, cilt 55, s. 338-344.
- Rubio-Gonzalez C, José-Trujillo E, Rodríguez-Gonzalez JA, Mornas A, Talha A. Low-velocity impact behavior of glass fiber-MWCNT/polymer laminates exposed to seawater and distilled water aging, *Polym Compos.* 2020;41(6):2181-2197.
- R. N. Mathur (2013), “Design Considerations for Successfully Using Long Elyaf Thermoplastic Composites as Substitutes for Metal”, *PlastiComp*, Inc. Minnesota, U.S.A.
- Shah, D. U. ,2013, Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review, *J Mater Sci* , 48:6083–6107.
- Subaşı, A., 2010, Yanıt yüzey yöntemi yardımı ile ısı değiştirici optimizasyonu, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi Erzurum*.
- Uysal, A. (2015), Relation Between Drill Bit Temperature and Chip Forms in Drilling of Carbon Black Reinforced Polyamide, *Journal of Thermal Engineering Yıldız Technical University Press*, cilt 1, s. 655-658.
- Ünal, A. R. (2013), Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozitlerin Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Vaxevanidis, N. M., Fountas, N.A., Ntziantzas, I., Koutsomichalis, A. ve Vencl, A. (2016), Experimental Investigation and Statistical Analysis of Surface Roughness Parameters in Milling of PA66-GF30 Glass-Fibre Reinforced Polyamid, *Tribological Journal Bultrib*, s. 304-314, Sofia.
- Wang W, Zhao Y, Chen S, et al. Low-velocity impact behaviors of glass fiber-reinforce polymer laminates embedded with shape memory alloy, *Compos Struct.* 2021; 272:114194
- Wu JA, Zhang Z, Dai X, Duan L, Lin Y, Sun M. Effect of stacking sequence on multi-point low-velocity impact and compression after impact damage mechanisms of UHMWPE composites, *Polym Compos.* 2021;42(12):6500-6511.
- Yıldırım, M., 2016, Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile AA7075-Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Üretimi Karakterizasyonu ve Aşınma

Davranışlarının İncelenmesi, Doktra Tezi, Karabük Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.

- Yıldırım, M. (2016), Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile AA7075-Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Üretimi Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Yıldırım, S.T., Ekin, C.E., 2006. Çelik Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donma Çözünme Etkilerinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(3), 359-366.
- Yıldızhan, H. (2008), Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Zinati, R. F. ve Razfar, M. (2014), Experimental and Modeling Investigation Of Surface Roughness in End-Milling Of Polyamide 6/Multi-Walled Carbon Nano-Tube Composite, *International Journal Advanced Manufacture Technology*, cilt 75, s. 979-989.
- Zitoun, R., El Mansori, M., ve Krishnaraj, V. (2013), Tribo-Functional Design of Double Cone Drill Implications in Tool Wear During Drilling of Copper Mesh/CFRP/Woven Ply, cilt 302, s. 1560-1567.

