

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞRUDAN MÜREKKEPLE KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ  
KULLANILARAK KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Emre OFLAZ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Teyfik DEMİR**

**EYLÜL 2023**





## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Emre OFLAZ



## ÖZET

Doktora Tezi

### DOĞRUDAN MÜREKKEPLE KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ KULLANILARAK KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Emre OFLAZ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Teyfik DEMİR

Tarih: Eylül 2023

Katmanlı imalat (Kİ) yöntemleri düşük miktarda üretimde önemli maliyet avantajı sağlaması, diğer imalat yöntemlerine göre geometri kısıtlarından bağımsız olması ve topoloji optimizasyonuna imkân vermesi gibi avantajlarıyla son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Kİ'nin bu avantajlarına rağmen, katmanlar arası zayıf bağlanma ve istenmeyen boşluklar gibi zayıf yönleri de bulunmaktadır. Kİ ile kompozit yapıların üretilmesinde, geri dönüşü olmayan çapraz bağlanma reaksiyonları sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip termoset polimerlerin kullanımı öne çıkmaktadır. Yeni gelişmekte olan doğrudan mürekkep metodu (DMM) ile Kİ yöntemi, termoset polimerlerin kullanımını kolaylaştırarak fiber takviyeli termoplastik baskının dezavantajlarını ortadan kaldırır. Bu metod, nano-kil gibi reolojik değiştiricileri ile sıvı viskozitesini ve akma dayanımını ayarlayarak kendi kendini destekleyen yapılar oluşturmak için yazdırılabilir mürekkeplerin hazırlanmasına dayanır. DMM ile üretilen karbon fiber içeren kompozit malzemeler ve bu malzemelerin aksel yük dayanımlarının belirlenmesine dair çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda 3-nokta eğme ve aksel çekme testleri ile fiber eklenti miktarı, fiber uzunluğu gibi üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi kısmen ifade edilmiştir. Ancak bu metod ile üretilmiş kompozit malzemelerin darbe ve yorulma dayanımlarına dair literatürde çalışma bulunmamıştır. Bu tez kapsamında

DMM ile Kİ yöntemiyle karbon fiber ve Kevlar eklentili kompozit malzemeler üretilmiş ve eksenel çekme, 3-nokta eğme, darbe ve yorulma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Farklı fiber türü, fiber oranı, fiber uzunluğu, nano-kil oranı ve hız oranı gibi üretim parametrelerinin bu mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi için ilgili üretim parametrelerinde ayrışan numune grupları üretilmiş, bahsi geçen parametrelerin statik ve dinamik mekanik özelliklere etkileri gerçekleştirilen mekanik testler ile incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda; nano-kil eklentisinin statik ve dinamik mekanik özellikler üzerinde önemli derece olumlu etkiye sahip olmasının yanında kompozit numunelerin daha düşük gerinim değerlerine ulaşabilmesi ile gevrek özellikler sergilemesine sebep olduğu görülmüştür. Kevlar fiber içeren numunelerin benzer oranda karbon fiber içeren numunelere göre daha yüksek çekme, 3-nokta eğme dayanımlarına sahip olduğu, yorulma dayanımında ise karbon fiber içeren numunelerin daha yüksek dayanımlara ulaştığı görülmüştür. 600µm, 800µm ve 1000µm olmak üzere 3 farklı uzunlukta Kevlar içeren gruplarda yorulma dayanımı ve 3-nokta eğme dayanımında en yüksek ortalama değerler 800µm, en düşük ortalama değerler 600µm uzunluğunda fiber içeren gruplarda olması fiber uzunluğu ile bu mekanik özellikler arasında pozitif korelasyon olduğunu göstermiştir. Ancak, Kevlar fiber içeren numunelerde fiberlerin esnek yapısı sayesinde karıştırma işlemi sırasında karbon fiberlerin aksine kırılmayarak daha kısa fiberlere dönüşmemesi ile homojen dağılmamış fiber öbeklerinin oluşmasının bu pozitif korelasyona olumsuz etkilediği görülmüştür. Fiber eklentili numunelerin, fiber içermeyen temel mürekkep numunelere göre daha düşük darbe dayanımına sahip olması görülmüştür. Bu sonuç, fiber eklentisi sırasında oluşan istenmeyen gözenekler ile ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte fiber oranının artması ile artan darbe dayanımı; fiber eklenmesi ile oluşan istenmeyen gözenekler sebebiyle düşen enerji sönümlenme miktarının fiber oranının yükselmesi telafi edildiğini göstermiştir. Hız oranının statik ve dinamik mekanik özellikler üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrudan mürekkep metodu, Katmanlı imalat, Kompozit

## **ABSTRACT**

Doctor of Philosophy

**PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS USING DIRECT INK WRITING  
ADDITIVE MANUFACTURING METHOD AND EXPERIMENTAL  
INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES**

Emre OFLAZ

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Teyfik DEMİR

Date: September 2023

Additive manufacturing (AM) methods have gained great importance in recent years with their advantages such as providing significant cost advantages in low-quantity production, being independent of geometry constraints compared to other manufacturing methods and allowing topology optimization. Despite these advantages, AM has weaknesses such as undesired gaps and poor bonding between layers. Thanks to irreversible cross-linking reactions, use of thermoset polymers in AM of composite structures results with better mechanical properties. The newly developing AM method, Direct ink writing (DIW) eliminates the disadvantages of fiber-reinforced thermoplastic printing by facilitating the use of thermosetting polymers. DIW is a liquid deposition process that relies on the yield stress of the liquid to form self-supporting structures. This method is based on the preparation of printable inks by adjusting the liquid viscosity and yield strength using rheological modifiers such as nano-clay. In literature, there are studies about carbon fiber reinforced composite materials produced DIW and their static test performances. In these studies, the mechanical properties of these structures and the effect of production parameters such as the amount of reinforcement and fiber length on the mechanical properties have been partially expressed through 3-point bending and axial tensile tests. However, no studies have been found in the literature on the impact and fatigue strength of thermoset polymer composite materials produced with this method. Within



the scope of this thesis, composite materials were produced with Kevlar and carbon fiber using DIW, and their axial tensile, 3-point bending, impact and fatigue strengths were experimentally examined. In order to examine the effects of production parameters such as different fiber type, fiber ratio, fiber length, nano-clay ratio, and velocity ratio on these mechanical properties, test sample groups separated in relevant production parameters were produced and their effects on static and dynamic mechanical properties were examined. It has been observed that nano-clay addition has a significant positive effect on static and dynamic mechanical properties, as well as causing the composite samples to reach lower strain values and exhibit brittle properties. It was observed that the specimens containing Kevlar fiber had higher tensile, 3-point bending strengths than the specimens containing carbon fiber at a similar rate, while the specimens containing carbon fiber reached higher strengths in fatigue strength. In groups containing 3 different lengths of Kevlar, which are 600 $\mu$ , 800 $\mu$  and 1000 $\mu$ , 800 $\mu$  group has the highest average value in fatigue strength and 3-point bending strength and 600 $\mu$  group has the lowest average values and it shows that there is a positive correlation between fiber length and impact resistance. It has been observed that fiber reinforced samples have lower impact resistance than base ink samples which don't contain any fiber. It can be inferred that the unwanted pores formed during fiber addition results in a dramatic decrease on impact resistance. However, as the fiber ratio increases, the impact resistance increases; it has been shown that the decreasing amount of energy absorption due to the unwanted pores formed by the addition of fiber is compensated by the increase in the fiber ratio. It was observed that the velocity ratio did not have a significant effect on the static and dynamic mechanical properties.

**Keywords:** Direct ink writing, Additive manufacturing, Composite.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve hiçbir zaman benden umudunu kesmeyip hep destek olan hocam Prof. Dr. Teyfik DEMİR'e; tez çalışmaları kapsamında yurdumuzdan çok uzaklarda geçirdiğim süre boyunca maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen ve laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayarak ilk defa çalıştığım bu konuda paha biçilemez tecrübeler kazanmamı sağlayan hocam Doç. Dr. Emrah ÇELİK'e; tez çalışmaları kapsamında katkılarıyla beni yönlendiren hocam Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN'a çok teşekkür ederim. Kıymetli tecrübelerinden ve laboratuvar imkanlarından faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ve öğretim üyelerine; test çalışmaları sürecinde altyapı imkanlarımdan faydalandığım Labiotech firmasına; kıymetli yardımları için Yunus USLAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Fatma Kübra ELİBOL'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÖZKAYA'ya; sağladığı burs imkanları için üniversitemiz TOBB ETÜ'ye, 2211-E bursu ve yurtdışı araştırmalarım için imkân veren 2214-A programı için TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında en büyük destekçim olan ancak bu zor ve meşakkatli süreci tamamlayabildiğimi göremediği için her zaman burukluğunu içimde taşıyacağım rahmetli Babam Mehmet OFLAZ'a teşekkür ederim. Dualarıyla her zaman manevi desteğini hissettiğim Annem Selvi OFLAZ'a teşekkür ederim. Tez süresince yardımlarını hiç eksik etmeyen ve manevi destek sağlayan SÜTCÜ ailesine teşekkür ederim. Yaşadığım en hüznü, en mutlu zamanlarımda yanımda olan, umutsuzluğa düştüğüm zamanlarda ayağa kalkabilmem her zaman elimden tutan sevgili Eşim Gamze SÜTCÜ OFLAZ'a çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>Vii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>xi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Doğrudan Mürekkep Metodu İle Katmanlı İmalat.....	1
1.2 Literatür Özeti .....	4
1.3 Tezin Amacı Ve Özgün Değeri.....	16
<b>2. DENEYSEL YÖNTEM</b> .....	<b>19</b>
2.1 Mürekkep Üretimi .....	19
2.2 DMM İle Kİ .....	27
2.3 Mekanik Testler .....	29
2.3.1 Temin edilen Kevlar fiberlerin karşılaştırılması ve mürekkep hazırlama sürecinin iyileştirilmesi .....	29
2.3.2 Çekme testi.....	34
2.3.3 Darbe testi .....	37
2.3.4 3-nokta eğme testi .....	41
2.3.5 Yorulma testi.....	44
2.4 Mann Withney U Testi .....	46
2.5 Test Planı.....	46
<b>3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME</b> .....	<b>49</b>
3.1 Test Sonuçları.....	49
3.1.1 İlk çalışma kapsamında gerçekleştirilen statik ve dinamik testler .....	49
3.1.2 Çekme testi sonuçları .....	53
3.1.2.1 HO ve nano-kil oranının çekme dayanımına etkisi.....	57
3.1.2.2 HO ve Kevlar oranının çekme dayanımına etkisi .....	58
3.1.2.3 Farklı fiber türlerinin çekme dayanımına etkisi .....	60
3.1.2.4 Fiber uzunluğunun çekme dayanımına etkisi.....	62
3.1.3 Darbe testi sonuçları.....	64
3.1.3.1 HO nano-kil oranı ve Kevlar oranının darbe dayanımına etkisi .....	67
3.1.3.2 Farklı fiber türlerinin darbe dayanımına etkisi.....	68
3.1.3.3 Fiber uzunluğunun darbe dayanımına etkisi .....	70
3.1.4 3-nokta eğme testi sonuçları.....	72
3.1.4.1 HO ve nano-kil oranının 3-nokta eğme dayanımına etkisi .....	75
3.1.4.2 HO ve Kevlar oranının 3-nokta eğme dayanımına etkisi.....	76
3.1.4.3 Farklı fiber türlerinin 3-nokta eğme dayanımına etkisi.....	78
3.1.4.4 Fiber uzunluğunun 3-nokta eğme dayanımına etkisi .....	81
3.1.5 Yorulma testi sonuçları .....	82
3.1.5.1 HO ve nano-kil oranının etkisi .....	86
3.1.5.2 HO ve Kevlar oranının yorulma dayanımına etkisi.....	86

3.1.5.3 Farklı fiber türlerinin yorulma dayanımına etkisi .....	87
3.1.5.4 Fiber uzunluğunun yorulma dayanımına etkisi .....	89
3.2 Değerlendirme .....	90
3.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler .....	93
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>95</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>99</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Doğrudan mürekkep metodu şematik gösterimi .....	2
Şekil 1.2 : DMM ile üretilmiş numuneler. (a) Test karakterizasyonu için 3B-basılmış dikdörtgen örnekler. (b) Petek dolgulu olarak üretilmiş numuneler .....	3
Şekil 1.3 : 3B doğrudan mürekkeple katmanlı üretim tekniğinin şematik gösterimi...	4
Şekil 1.4 : Mürekkeplerin reolojik özellikleri (a) viskozite, (b) modülüs ve (c) çekme testi gerilme-gerinim grafiği .....	5
Şekil 1.5 : Hücresel yapılı kompozitlerin basma testi grafiği .....	6
Şekil 1.6 : Kompozit parçaların mekanik özellikleri (a) Elastisite Modülü, (b) Eğilme mukavemeti, (c) Kopma gerinimi (%) ve kullanılan mürekkeplerin reolojik özellikleri (d) Kayma oranı, (e) Salımlı kayma gerilmesi.....	7
Şekil 1.7 : Dönme 3 boyutlu baskı. (a) baskı sırasında nozulu döndürmek için kullanılan sistem. (b) Nozulun açılma hızı ( $\omega$ ) ve çevirme hızı ( $v$ ) ile helisel desen elde etmek için döner nozul boyunca baskı sırasında fiber oryantasyonunun şematik görünümü. (c) Dönme olmadan, (d) yüksek bir dönme hızıyla basılmış filamentlerin optik mikrografları. (e ve f) Aynı boyutsuz rotasyon oranları için şematik olarak gösterilen ideal fiber düzenlemesi .....	8
Şekil 1.8 : Dönel 3B baskı ile elde edilmiş kompozit parçalara uygulanan testlerin grafikleri (a) Çekme testi grafiği (b) Hasar sırasında çatlak ilerlemesini incelemek için yapılmış L şeklinde numuneler (c) L şeklinde numunelerin çekme testi grafiği (d) Delmek yüklemesine maruz bırakılan numunelerin yük- penetrasyon grafiği.....	9
Şekil 1.9 : Boylamasına Kİ ile üretilen ve sıkıştırma kalıpla üretilen numunelerin çekme testi sonuçları, (a) Çekme dayanımı, (b) Çekme modülüsü. ....	10
Şekil 1.10 : Boylamasına Kİ ile üretilen ve sıkıştırma kalıpla üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonuçları, (a) Eğilme dayanımı, (b) Eğilme modülüsü .....	11
Şekil 1.11 : Farklı karıştırma süreleri ile elde edilen mürekkeplerden üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonuçları .....	13
Şekil 1.12 : Farklı karıştırma süreleri ile elde edilen mürekkeplerden üretilen numuneler, (a) 180 saniye, (b) 360 saniye, (c) 540 saniye, (b) 720 saniye .....	13
Şekil 2.1 : (a) Örülmüş kumaş halinde temin edilen Kevlar örneği, (b) Kumaştan elde edilen fiber siciminin metal levha üzerine yapıştırılması (c) Kevlar siciminin lazer ile kesilmesi.....	20
Şekil 2.2 : 12 watt parametreleriyle yapılan kesim örneğinin mikroskop görüntüsü. 21	
Şekil 2.3 : (a) Kesim sonrası Kevlar fiberler (b) Levha üzerinden Kevlar fiberlerin toplanması .....	21
Şekil 2.4 : Lazer ile kesilmiş Kevlar fiberlerin SEM görüntüleri, (a) x230 büyütme, (b) x430 büyütme .....	22
Şekil 2.5 : Fiberlerin optik mikroskop altında görüntüleri ve uzunluk ölçümleri.....	22
Şekil 2.6 : Kesilmiş olarak temin edilen Kevlar fiberlerin SEM görüntüleri, (a)x230 büyütme, (b)x330 büyütme.....	23
Şekil 2.7 : 600 $\mu$ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri .....	24

Şekil 2.8 : 800 $\mu$ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri .....	24
Şekil 2.9 : 1000 $\mu$ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri .....	25
Şekil 2.10 : Mürekkep hazırlama sürecinin şematik gösterimi. ....	26
Şekil 2.11 : DMM ile üretim için temel sistem bileşenleri (a) Basınç kontrollü hava dağıtıcı ve şırınga (b) 3 eksenli hareket kontrol sistemi.....	27
Şekil 2.12 : (a) Mürekkebin şırıngaya doldurulması ve (b) şırınganın 3B hareket sistemine yerleştirilmesi.....	29
Şekil 2.13 : Kırılma öncesi(a) ve sonrası(b) numuneler. ....	29
Şekil 2.14 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen fiber ile üretilen numunelerin 3- nokta eğme dayanımları. ....	30
Şekil 2.15 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen fiber ile üretilen numunelerin 3- nokta eğme gerinim değerleri. ....	31
Şekil 2.16 : Nawafleh vd. ve Hmeidat vd. çalışmalarında elde edilen 3-nokta eğme dayanımları.....	32
Şekil 2.17 : Nawafleh vd. ve Hmeidat vd. çalışmalarında elde edilen 3-nokta eğme gerinim değerleri. ....	32
Şekil 2.18 : (a) Nawafleh vd. çalışmasında kullanılan, (b) Hmeidat vd. çalışmalarında kullanılan ve (c) iyileştirilmiş mürekkep hazırlama metodu. ....	33
Şekil 2.19 : Nawafleh vd. metodu, Hmeidat vd. metodu ve iyileştirilmiş mürekkep hazırlama metodu ile üretilmiş numunelerin 3-nokta eğme dayanımları .....	34
Şekil 2.20 : Çekme testi numuneleri (a) Çekme numunesi tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan çekme numuneleri. ....	35
Şekil 2.21 : Çekme test düzeneği (a) genel görünüş (b) numunenin çenelere bağlanması. ....	36
Şekil 2.22 : Çekme testi sonuçlarını içeren yük-yer değiştirme grafiği ve test sonuçları tablosu. ....	37
Şekil 2.23 : Darbe test şematik gösterimi.....	38
Şekil 2.24 : Darbe testi numuneleri (a) numune tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan darbe numuneleri.....	39
Şekil 2.25 :(a) Darbe test düzeneği, (b) test sonucun görüldüğü cihaz ekranı ve (c) test numunesinin çeneler arasına yerleştirilmesi. ....	40
Şekil 2.26 : 3-nokta eğme testi numuneleri (a) numune tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan numune.....	41
Şekil 2.27 : ASTM D7264 Standardına uygun 3-nokta eğme testi. ....	42
Şekil 2.28 : 3-nokta eğme testleri için tasarlanan test aparatları. ....	42
Şekil 2.29 : 3-nokta eğme testlerinin gerçekleştirildiği test cihazı. ....	43
Şekil 2.30 : Döngüsel yükleme işleminin şematik gösterimi .....	44
Şekil 2.31 : Yorulma test cihazı .....	44
Şekil 2.32 : Yorulma testi iş akış şeması.....	45
Şekil 2.33 : Yorulma testleri verileri ile oluşturulmuş SN grafiği .....	46
Şekil 3.1 : Test için gönderilen numuneler (a) temel mürekkep ve (b) %6,3 Kevlar fiber içeren numuneler .....	49
Şekil 3.2 : (a) İlk çalışmada kullanılan fiberlerin görüntüsü ve (b) kullanılan mürekkep ekstrüzyon sisteminin şematik görüntüsü .....	50
Şekil 3.3 : Numunelerin 3-nokta eğme dayanımları. ....	51
Şekil 3.4 : Numunelerin hasar anında eğilme gerinimleri.....	51
Şekil 3.5 : Numune gruplarına ait SN grafikleri. ....	52

Şekil 3.6 : Test numunelerinin Dinamik kırıkların optik mikroskop görüntüleri. a-c temel mürekkep numunesi, d-f %3,5 Kevlar ve g-i %6,3 Kevlar fiber içeren kompozit numune.....	53
Şekil 3.7 : Tüm test gruplarının ortalama çekme dayanımları.....	55
Şekil 3.8 : Tüm test gruplarının ortalama çekme gerinimleri.....	56
Şekil 3.9 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme dayanımları grafiği.....	57
Şekil 3.10 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.....	58
Şekil 3.11 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme dayanımı grafiği.....	59
Şekil 3.12 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.....	59
Şekil 3.13 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme dayanımı grafiği.....	61
Şekil 3.14 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.....	61
Şekil 3.15 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme test sonuçları.....	63
Şekil 3.16 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.....	63
Şekil 3.17 : Tüm test gruplarının darbe testi sonuçları.....	66
Şekil 3.18 : HO, nano-kil oranı ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe dayanımları grafiği.....	67
Şekil 3.19 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe testi sonuçları.....	69
Şekil 3.20 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe testi sonuçları.....	71
Şekil 3.21 : Tüm test gruplarının eğilme dayanımları grafiği.....	73
Şekil 3.22 : Tüm test gruplarının eğilme gerinim grafiği.....	74
Şekil 3.23 :HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği.....	75
Şekil 3.24 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği.....	76
Şekil 3.25 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım.....	77
Şekil 3.26 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği.....	77
Şekil 3.27 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği.....	79
Şekil 3.28 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği.....	80
Şekil 3.29 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanımları.....	81
Şekil 3.30 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği.....	81
Şekil 3.31 : Yorulma dayanımları ortalama ve maksimum değerleri.....	85
Şekil 3.32 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların SN grafiği.....	86



Şekil 3.33 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların SN grafiği. ....	87
Şekil 3.34 : KF eklentili numunelerin yorulma dayanımları.....	88
Şekil 3.35 : Kevlar ve KF içeren grupların yorulma dayanımları .....	88
Şekil 3.36 : Farklı uzunluklarda fiber içeren numunelerin SN grafikleri.....	89



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Lazer ile kesilmiş Kevlar fiberlerin uzunluk ölçümleri .....	23
Çizelge 2.2 : Kesilmiş olarak temin edilen fiber örneklerinin uzunlukları ve ortalama uzunluk değerleri .....	25
Çizelge 2.3 : Mürekkep bileşenlerinin yoğunlukları.....	28
Çizelge 2.4 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen Kevlar fiberler kullanılarak üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonucunda elde edilen ortalama eğilme dayanımı ve eğilme gerinimi değerleri .....	30
Çizelge 2.5 : Nawafleh vd.(2020) ve Hmeidat vd.(2020) çalışmasında üretilen mürekkep numunelerinin ortalama 3-Nokta eğme gerilme ve gerinim değerleri. ....	31
Çizelge 2.6 : Karşılaştırılan mürekkep üretim metotlarıyla üretilen numunelerin 3-nokta eğme dayanımları.....	33
Çizelge 2.7 : Farklı içerik ve özellikte hazırlanan numune gruplarının mürekkep içerikleri ve üretilen numune sayıları. ....	48
Çizelge 3.1 : Numune gruplarının ortalama eğilme dayanımı ve hasar anında eğilme gerinimi değerleri.....	50
Çizelge 3.2 : Dinamik test verileri .....	52
Çizelge 3.3 : Tüm numune gruplarının çekme testi sonuçları. ....	54
Çizelge 3.4 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri. ....	58
Çizelge 3.5 : HO ve Kevlar oranının Etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri	60
Çizelge 3.6 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.....	62
Çizelge 3.7 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.....	64
Çizelge 3.8 : Tüm numune gruplarının ortalama darbe dayanım değerleri. ....	65
Çizelge 3.9 : HO, nano-kil oranı ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri. ....	68
Çizelge 3.10 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri. ....	70
Çizelge 3.11 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri. ....	71
Tablo 3.12 : Tüm numune gruplarının 3-nokta eğme testi ortalama gerilme ve hasar anında gerinim değerleri. ....	72
Çizelge 3.13 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.....	76

Çizelge 3.14 : HO ve Kevlar Oranının Etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri. ....	78
Çizelge 3.15 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.....	80
Çizelge 3.16 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.....	82
Çizelge 3.17 : Tüm grupların yorulma testi verileri.....	83
Çizelge 3.18 : Tüm numune gruplarının ortalama ve maksimum yorulma dayanımları. ....	84



## KISALTMALAR

<b>3B</b>	: 3 Boyutlu
<b>CKNH</b>	: Cihaz Kaynaklı Numune Hatası
<b>CT</b>	: Bilgisayarlı Tomografi (Computed Tomography)
<b>DMM</b>	: Doğrudan Mürekkep Metodu
<b>FDM</b>	: Eriyik Yığıma Modellemesi (Fused Deposition Modelling)
<b>HKO</b>	: Hacimsel Karışım Oranı
<b>HO</b>	: Hız Oranı
<b>KF</b>	: Karbon Fiber
<b>Kİ</b>	: Katmanlı İmalat
<b>MWU</b>	: Mann-Whitney U
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskopisi (Scanning Electron Microscope)
<b>YDD</b>	: Yüzey Döşeme Dili



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\omega$	Açısal Hız
$v$	İlerleme Hızı
$R$	Nozul Yarıçapı
$\varphi$	Fiber Yerleşim Açısı
$V_m$	Mürekkep Nozul Çıkış Hızı
$M_{(10s)}$	10 Saniyede Ekstrüde Edilen Mürekkep Miktarı
$D_m$	Mürekkep Yoğunluğu
$D_e$	Epoksi Reçine Yoğunluğu
$D_f$	Fiber Yoğunluğu
$D_n$	Nano-Kil Yoğunluğu
$D_k$	Kütleme Ajanı Yoğunluğu
$H_e$	Epoksi Reçine HKO
$H_f$	Fiber HKO
$H_n$	Nano-Kil HKO
$H_k$	Kütleme Ajanı HKO
$V_p$	Yazdırma Hızı
VR	Hız Oranı
P	Yük
A	Numune Kesit Alanı
$\varepsilon$	Gerinim
$\delta$	Yer Değiştirme
L	Numune Boyu
$I_s$	Darbe Dayanımı
$E_i$	Darbe Enerjisi
MPa	Megapaskal
$\mu m$	Mikrometre
g	Gram
$cc^3$	Santimetre küp



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Doğrudan Mürekkep Metodu ile Katmanlı İmalat

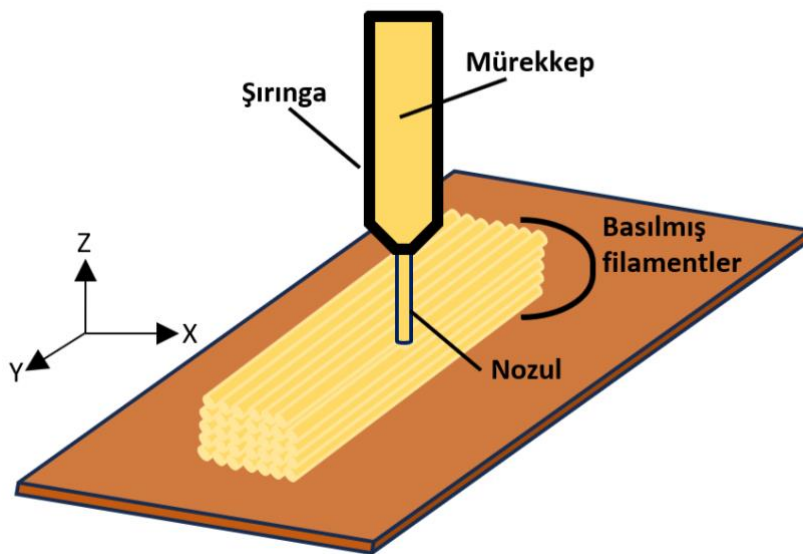
Mikro ve nano boyutta malzeme üretimindeki yeni metotlar, malzeme bilimi, kimya ve biyoloji gibi alanlarda bilimsel ve teknolojik gelişmeleri yönlendirmektedir. Üç boyutlu katmanlı üretim teknolojileri ve bu teknolojide kat edilen mesafeler, bahsedilen bilim alanlarında yaşanan gelişmelerde önemli rol oynamaktadır. Katmanlı imalat (Kİ) olarak da adlandırılan, 3 Boyutlu (3B) baskı, malzemelerin, genellikle katman katman, birleştirilmesiyle 3B tasarım dosyasından cisimlerin üretilmesidir. Bu metot ilk olarak 1986 yılında Charles Hull tarafından tanımlanmıştır(Hull, 1984). Kİ, istenilen geometrik doğruluğa erişirken ortaya çıkan atıkların azaltılması için, katmanlar halinde malzeme ekleyerek objelerin üretilmesini sağlar (Levy, 2003). Bir Bilgisayar destekli tasarım dosyası ya da istenilen görüntü verisine, 3 boyutlu mesh uygulanması ile başlanır. Genellikle YDD (Yüzey Döşeme Dili, STL: Surface Tessellation Language) dosyası üretilir. Mesh verileri 2 boyutlu katmanlar halinde 3B yazıcı makinesine gönderilir. Katmanlı imalat yöntemleriyle temelde termoplastik malzemelerin üretimi yapılmaktayken, bu teknolojide yaşanan gelişmeler ile biyolojik doku, yarı-iletken, polimer ve kompozit gibi çok çeşitli alanda malzemeler kullanılarak, karmaşık geometride üretimlerin yapılması mümkün olmuştur.

3B baskı teknolojisi ile termoplastik polimer malzemelerin yanında, epoksi reçine gibi termoset polimer malzemeler işlenebilir. Epoksi reçineler, polimerleşme sürecinin tamamlanabilmesi için termal ya da ultraviyole destekli kürlemeye ihtiyaç duyarlar. Ayrıca başlangıçta düşük viskozite değerine sahipken, kürleme işleminin sonucunda yüksek değerlere ulaşırlar(Dou, Zhang, Ma, & Gu, 2012; H. Gu, 2016; J. Gu, 2016). Bu yüzden epoksi reçineler ısı veya ultraviyole destekli baskı süreçleri için uygundur. Termoset polimerlerin 3B baskıları, karmaşık düşük ağırlıklı yapılar için havacılık endüstrisinde (Kroll & Artzi, n.d.), yapısal modeller için mimaride(Wong & Hernandez, 2012), replika ve eğitim için sanat alanında (Short, 2015) ve doku baskıları için medikal alanında(Murphy & Atala, 2014) tercih edilmektedir. Bununla birlikte, 3B baskı polimer ürünlerin çoğu hâlâ işlevsel bileşenler yerine kavramsal prototipler olarak kullanılmaktadır. Çünkü 3B baskı ile üretilen saf polimer ürünler, tam işlevsel



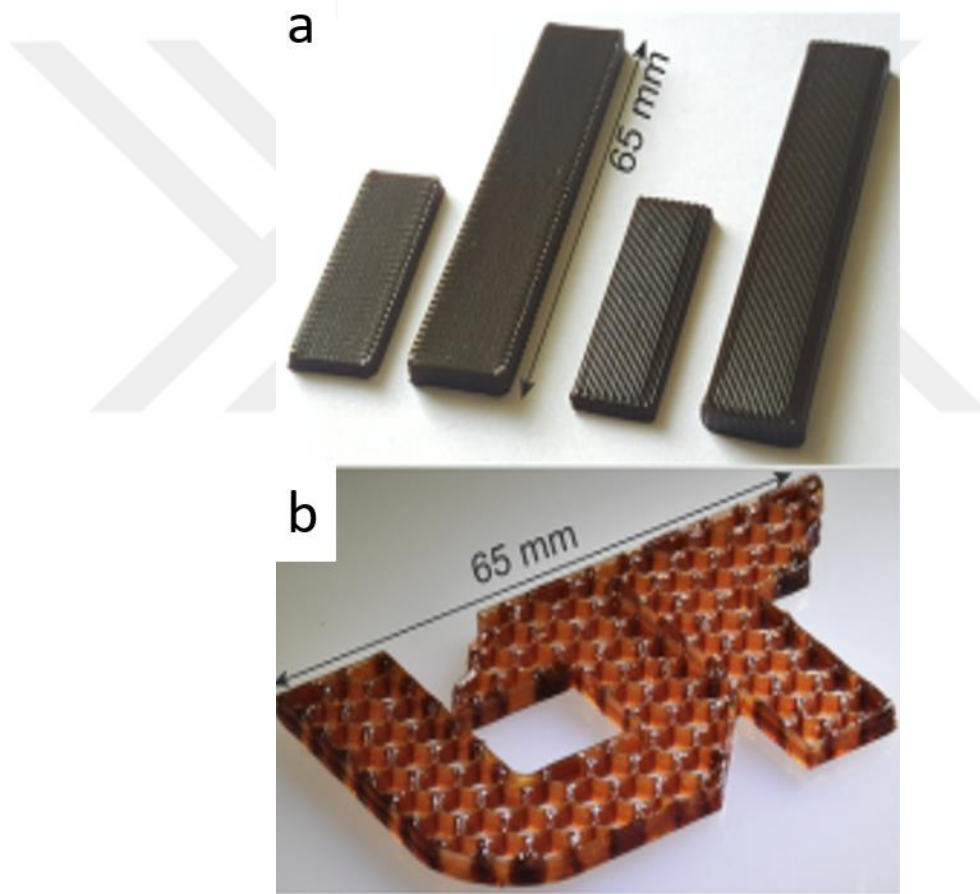
ve yük taşıyan parçalar olarak mukavemet ve işlevsellikten yoksundur. Bu gibi dezavantajlar, 3B baskılı polimerlerin geniş endüstriyel uygulamasını kısıtlamaktadır. Polimer kompozitlerin 3 boyutlu baskısı, matris ve takviyeleri birleştirerek, tek başına herhangi bir bileşen tarafından elde edilemeyen daha kullanışlı yapısal veya fonksiyonel özelliklere sahip bir sistem elde ederek bu problemleri çözmektedir (Thomas, n.d.). Parçacık, fiber veya nanomateryal güçlendirmelerin polimerlere dahil edilmesi, yüksek mekanik performans ve yüksek işlevsellik ile karakterize edilen polimer matris kompozitlerinin üretimine izin verir. Kalıplama, döküm ve işleme gibi geleneksel imalat teknikleri ile karmaşık geometriye sahip kompozit yapıda ürünler üretilebilir (Huang, 2013). Bu yöntemler ile kompozitlerin üretim süreci ve performansı iyi kontrol edilse de, karmaşık içyapıyı kontrol etme kabiliyeti sınırlıdır. 3B baskı, tipik atık olmadan da karmaşık kompozit yapıları üretebilir. Kompozitlerin boyutu ve geometrisi, bilgisayar destekli tasarım yardımıyla hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Böylece, kompozitlerin 3B baskısı, süreç esnekliği ve yüksek performanslı ürünlerin mükemmel bir kombinasyonunu sağlar.

"Doğrudan mürekkep" terimi, kontrollü bir mimariye ve bileşime sahip malzemeler oluşturmak için bir mürekkep biriktirme nozulunu hareket ettiren, bilgisayar kontrollü bir aktarım metodu kullanan bir Kİ yöntemi şeklinde tanımlanabilir(Lewis & Gratson, 2004). Doğrudan mürekkep metodu (DMM) ile Kİ yönteminin şematik gösterimi Şekil 1.1'de verilmiştir.

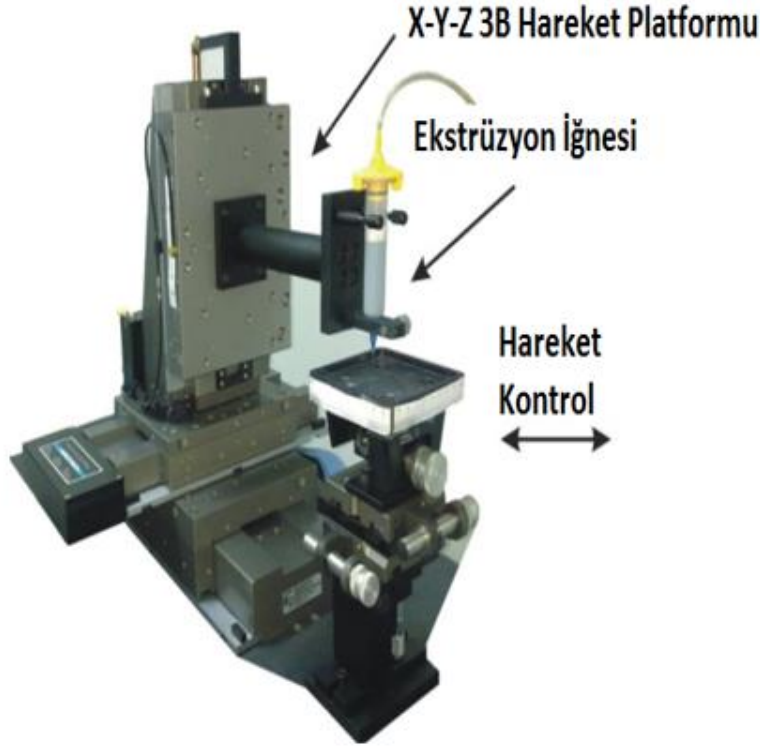


Şekil 1.1 : Doğrudan mürekkep metodu şematik gösterimi

DMM ile üretilen numunelere dair örnekler Şekil 1.2’de, bu metot için geliştirilmiş bir 3B üretim düzeneği de Şekil 1.3’te gösterilmektedir. DMM, kendi kendini destekleyen yapılar oluşturmak için sıvının akma dayanımının kontrol edilmesi esasına dayanan bir sıvı biriktirme işlemidir. İşlem, nano-kil gibi reolojik değiştiricileri kullanarak sıvı viskozitesini ve akma dayanımını ayarlayarak yazdırılabilir mürekkeplerin hazırlanmasıyla gerçekleştirilir. Baskı için erime gerekli olmadığından, termoset polimerler bu yöntemle basılabilir. Yapının tamamı oda sıcaklığında basılır ve ikincil bir işlemde kürlenir. Bu süreç hem baskı işlemi basitleştirir hem de mekanik özelliklerin termal baskı geçmişi ve baskı ortamı koşullarına bağımlılığını önemli ölçüde azaltır.



Şekil 1.2 : DMM ile üretilmiş numuneler. (a) Test karakterizasyonu için 3B-basılmış dikdörtgen örnekler. (b) Petek dolgulu olarak üretilmiş numuneler (Hmeidat, 2018).

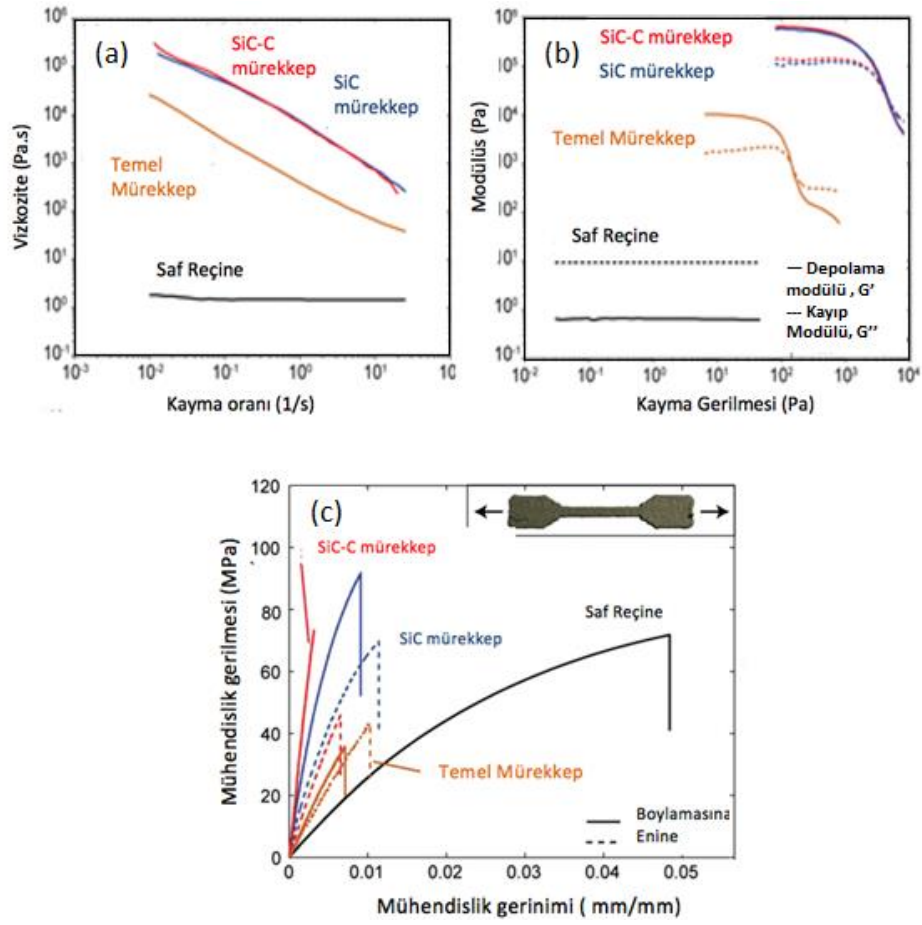


Şekil 1.3 : 3B doğrudan mürekkeple katmanlı üretim tekniğinin şematik gösterimi (Li, 2015).

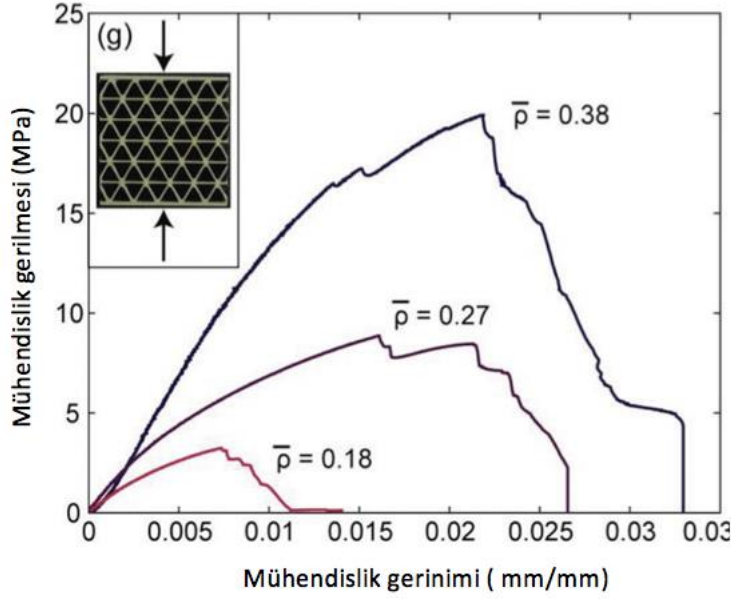
## 1.2 Literatür Özeti

Compton ve Lewis tarafından doğrudan mürekkep metoduyla hafif hücreli kompozitler üretilmiş ve mekanik testler yapılmıştır (Compton & Lewis, 2014). Mürekkep bileşiminde temel malzeme olarak epoksi reçine (Epon 826), nano-kil (kalınlık 1nm, uzunluk 100nm) kullanılmıştır. Dolgu malzemelerinin etkisinin incelenmesi için biri çekme doğrultusunda diğeri çekme doğrultusuna dik olmak üzere iki farklı baskı yönü ile yazılmış çekme numuneleri üretilmiştir. Nano-kil ve fiber eklentileriyle üretilen yüksek viskozite ve modülüs değerlerine sahip mürekkeplerin reolojik özellikleri Şekil 1.4a ve Şekil 1.4b’de verilmiştir. Üretilen test numunelerine uygulanan çekme testinden elde edilen gerilme-gerinim grafiği Şekil 1.4c’de görülmektedir. Şekil 1.4c’deki grafikte fiber eklentileriyle elde edilen kompozit yapıların saf reçine ve temel mürekkeple üretilen numunelere göre daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bahsi geçen çalışmada 3 boyutlu hücreli yapıları üreterek basma testi uygulanmıştır. Farklı yoğunluklarda üretilen yapıların basma testi sonuç grafiği Şekil 1.5’te görülmektedir. Çalışma sonucunda üretilen kompozit parçaların Young Modülüsü değerinin en iyi 3 boyutlu

ticari kompozitlerden 2 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca dolgu malzemelerin yerleşiminin kontrol edilebileceğini, böylece hasar oluşması beklenen bölgelerde optimizasyon yapılabileceği belirtilmiştir.



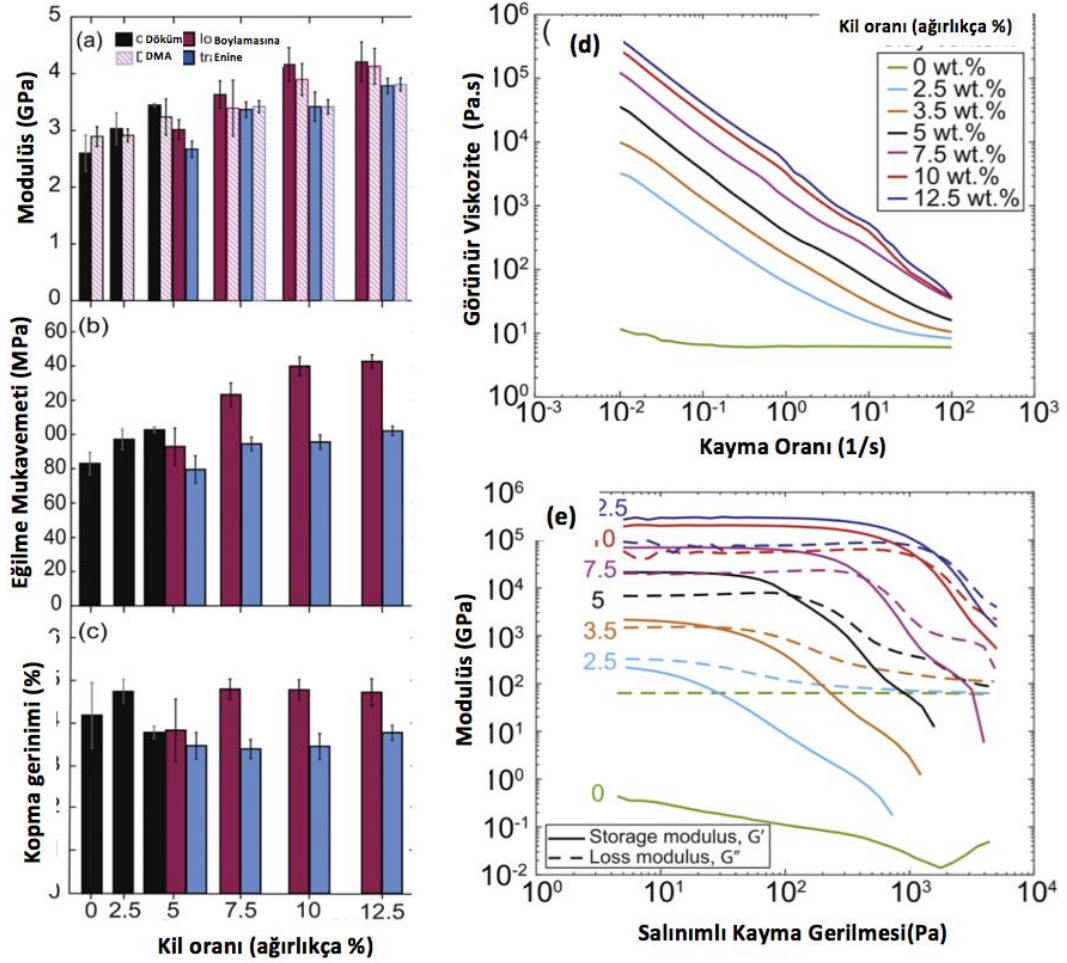
Şekil 1.4 : Mürekkeplerin reolojik özellikleri (a) viskozite, (b) modülüs ve (c) çekme testi gerilme-gerinim grafiği (Compton & Lewis, 2014)



Şekil 1.5 : Hüresel yapılı kompozitlerin basma testi grafiği (Compton & Lewis, 2014).

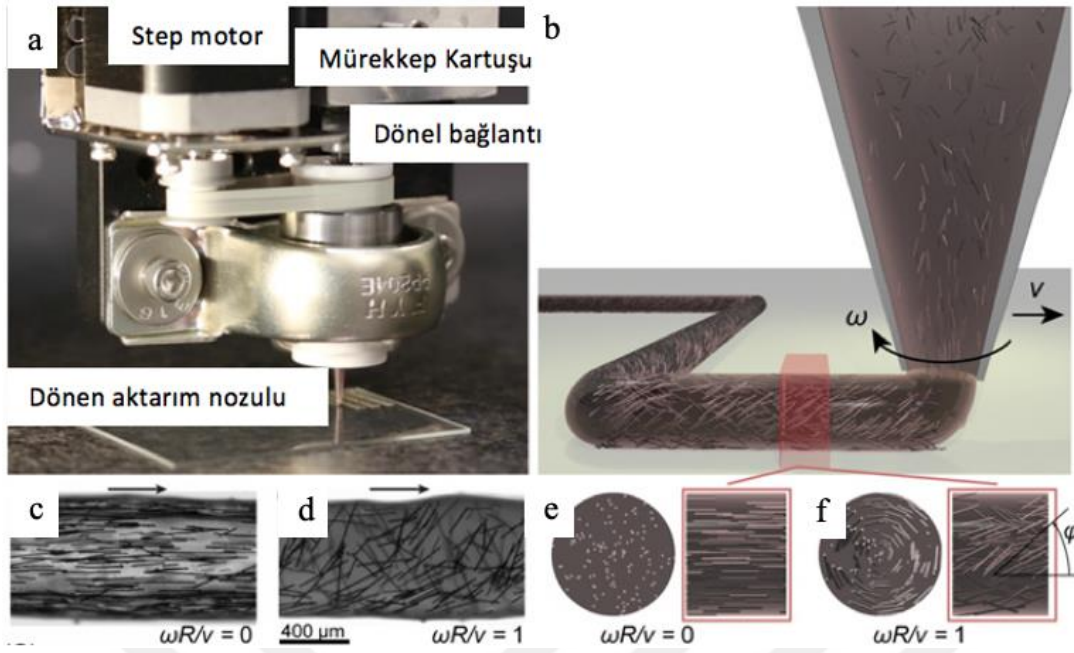
Hmeidat vd. (2018) yaptığı çalışmada, fiber eklenti yokluğunda nano-kilin eklentisinin epoksi reçinenin reolojik özellikleri ve baskı davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üretilen 3B baskı numunelerinin termo-mekanik özellikleri üzerinde kil içeriğinin ve biriktirme işleminin etkilerini incelenmiştir. Bu çalışmada epoksi reçine olarak, Epon 826 (Momentive Specialty Chemicals, Inc. Columbus, OH) kullanılmıştır. Ağırlıkça %0, %2,5 ve %5 kil içeren mürekkep formülasyonları, 3B baskı için çok akışkan olduğu için, basılı numunelerle aynı boyutlardaki silikon kalıplara dökülerek üretilmiştir.

Mürekkepler, ağırlıkça %12,5'e kadar sabit miktarlarda epoksi reçine ve nano-kil trombositleri içerecek şekilde formüle edilmiştir. Her bir mürekkep formülasyonunun reolojik özellikleri, paralel plaka reometrisi kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Basılı kompozitlerin mekanik özellikleri, üç-nokta eğme testi ve dinamik mekanik analiz kullanılarak ölçülmüştür. Reolojik özellikler ve mekanik testler sonu elde edilen mekanik özellikler Şekil 1.6'da verilmiştir. Bu çalışmada DMM ile üretilmiş epoksi nanokompozitlerin akma dayanımının, kısa fiber eklentili kompozitler de dahil olmak üzere diğer 3B baskılı termoset kompozitler için literatürde daha önce bildirilen değerlere göre çok daha yüksek olan 80 MPa ila 143 MPa arasında olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.6 : Kompozit parçaların mekanik özellikleri (a) Elastisite Modülü, (b) Eğilme mukavemeti, (c) Kopma gerinimi (%) ve kullanılan mürekkeplerin reolojik özellikleri (d) Kayma oranı, (e) Salınımlı kayma gerilmesi) (Hmeidat, 2018).

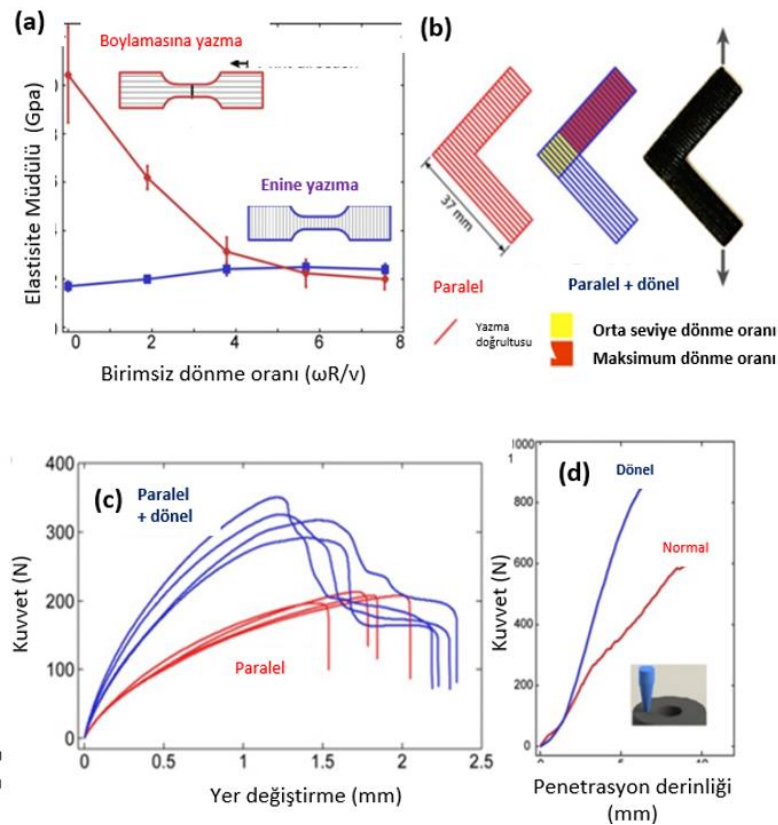
Raney vd. (Raney, 2018) tarafından sunulan çalışmada DMM ile Kİ sürecine dönen nozul sistemi ekleyerek, dönel 3B baskı metoduyla kompozit malzemeler üretilmiş ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Standart DMM'den farklı olarak doğada bulunan kompozitlerden helisel bir fiber yerleşimi olduğunu belirterek dönel nozul sisteminin kullanıldığı belirtilmiştir. Mürekkebin dönel olarak yazılması için step motor tarafından istenilen hızda döndürülebilen ve Şekil 1.7'de görülen nozul sistemi tasarlanmıştır.



Şekil 1.7 : Dönme 3 boyutlu baskı. (a) baskı sırasında nozulu döndürmek için kullanılan sistem. (b) Nozulun açısız hızı ( $\omega$ ) ve çevirme hızı ( $v$ ) ile helisel desen elde etmek için döner nozul boyunca baskı sırasında fiber oryantasyonunun şematik görünümü. (c) Dönme olmadan, (d) yüksek bir dönme hızıyla basılmış filamentlerin optik mikrografları. (e ve f) Aynı boyutsuz rotasyon oranları için şematik olarak gösterilen ideal fiber düzenlemesi (Raney, 2018).

Dönel nozul sisteminde nozulun açısız hızı ( $\omega$ ), nozulun ilerleme hızı ( $v$ ) ve basılan filamentlerin çapını doğrudan etkileyen nozul çapı ( $R$ ) gibi parametreler fiber yerleşim açısını ( $\phi$ ) etkileyen en önemli faktörlerdir. Bahsedilen parametreler ile fiber yerleşim açısı arasındaki ilişkinin daha iyi belirtilebilmesi için " $R\omega/v$ " birimsiz dönüş oranı tanımlanmış ve Şekil 1.7'deki grafikte fiber yerleşim açısı ( $\phi$ ) dönüş oranının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Dönel baskının malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi için çekme ve delme yüklemesi testleri yapılmış ve testler sonucu elde edilen grafikler Şekil 1.8'de belirtilmiştir. Çekme numunesi şeklinde üretilip çekme testi uygulanan numunelerde dönüş oranının çekme dayanımı üzerine etkisi Şekil 1.8a'da görülmektedir. Boylamasına basılan numunelerde dönüş oranı sıfır iken yazma yönüne paralel olarak yerleşen fiberler nedeniyle çekme testi sonucunda daha yüksek elastisite modülü görülmüştür. Dönüş oranının artmasıyla fiberlerin yerleşim açıları artarak yazma doğrultusuna dik olmaya başlamışlardır. Dönüş oranı yaklaşık 5 olduğunda her iki yazma yönüne ait numunelerin elastisite modülü değerleri

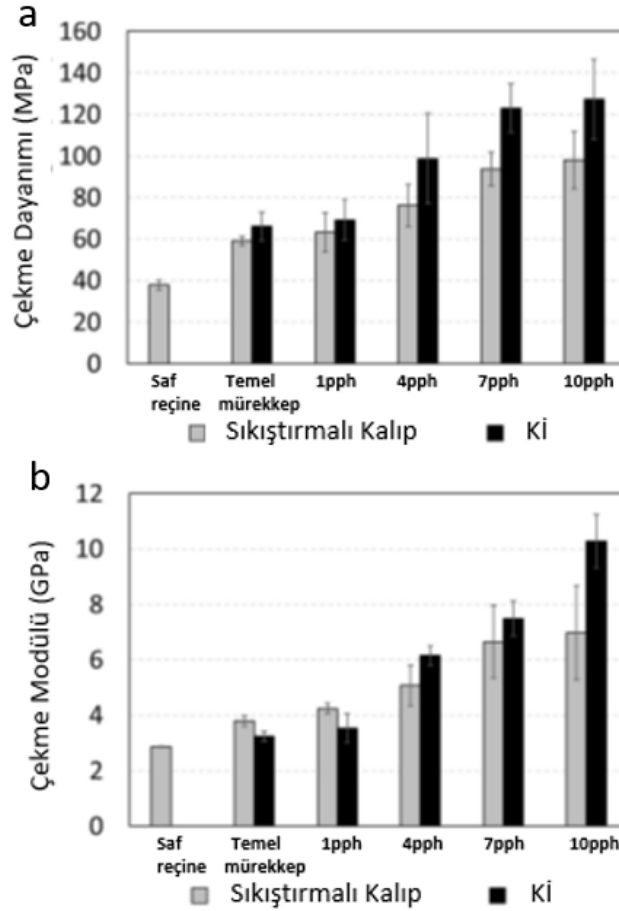
eşitlenmiştir. Fiber yerleşiminin çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için Şekil 1.8b’de görülen L şeklinde barlar hazırlanmış ve L’nin her iki ucundan hasar oluşana kadar çekme işlemi uygulanmıştır. Yük-yer değiştirme grafiği Şekil 1.8c’de görülen çekme testi sonucunda, dönel olarak üretilen ( $R\omega/v=4,8$ ) barların standart olarak üretilenlere göre yaklaşık olarak 2 katı fazla yüke dayanabildiği görülmüştür. Son olarak fiber yerleşiminin etkisinin incelenebilmesi adına üretilen kübik şekilli parçalara delme testi yapılmıştır. Dönel ( $R\omega/v=3,8$ ) ve standart olarak üretilen numunelere 0,05 mm/s hızla silindirik bir zımba ile yük uygulanmış ve Şekil 1.8d’de görülen yük-penetrasyon grafiği elde edilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alanlar incelendiğinde dönel olarak üretilmiş numunelerin daha çok enerji soğurduğu görülmektedir. Yapılan testler sonucunda dönel olarak üretilen kompozitlerin daha yüksek rijitlik, dirençlilik ve hasar toleransı değerlerine sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 1.8 : Dönel 3B baskı ile elde edilmiş kompozit parçalara uygulana testlerin grafikleri (a) Çekme testi grafiği (b) Hasar sırasında çatlak ilerlemesini incelemek için yapılmış L şeklinde numuneler (c) L şeklindeki numunelerin çekme testi grafiği (d) Delmek yüklemesine maruz bırakılan numunelerin yük- penetrasyon grafiği (Raney, 2018).

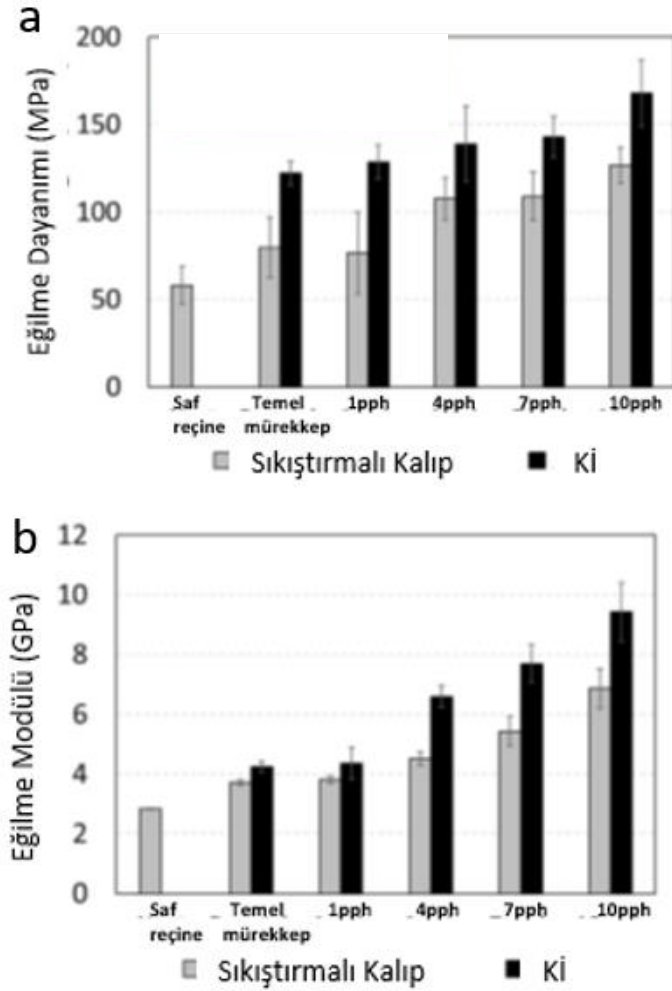


Pierson vd. (Pierson, 2019) tarafından sunulan çalışmada, mürekkep hazırlama parametrelerinin, kullanılan fiber özelliklerinin ve baskı doğrultusunun DMM ile üretilen kompozit numunelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan mürekkepte EPON reçine 826 (Hexion Inc.) kullanılmış ve mürekkep içine 5  $\mu\text{m}$  çapında karbon fiber lifler eklenmiştir. Fiber eklemenin ve Kİ metodunun etkilerinin daha iyi incelemesi için Kİ ile üretilen numuneler, sıkıştırma kalıplama ile üretilen numuneler ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için aksel çekme ve 3-nokta eğme testleri uygulanmıştır. Her bir mürekkep konfigürasyonunun testleri için en az 5'er numune üretilmiştir. Çekme testi için ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) standardına göre numune üretimi ve testler gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçları Şekil 1.9'da görülmektedir.



Şekil 1.9 : Boylamasına Kİ ile üretilen ve sıkıştırma kalıpla üretilen numunelerin çekme testi sonuçları, (a) Çekme dayanımı, (b) Çekme modülüsü (Pierson, 2019).

3-nokta eğme testleri ise ASTM D7264 (Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials) standardına göre uygulanmıştır. Çekme testi sonuçları Şekil 1.10'da görülmektedir. Mekanik test sonuçları incelendiğinde lif yüklemenin rijitlik ve eğilme mukavemetini önemli miktarda artırdığı görülmektedir.

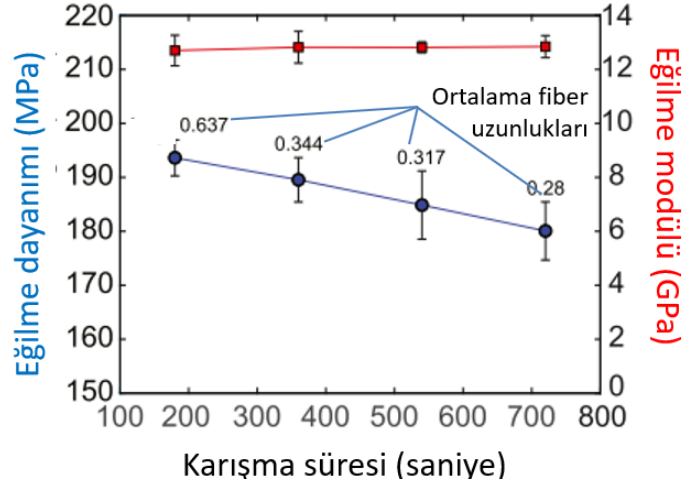


Şekil 1.10 : Boylamasına Kİ ile üretilen ve sıkıştırma kalıpla üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonuçları, (a) Eğilme dayanımı, (b) Eğilme modülüsü (Pierson, 2019).

Hmeidat vd. yaptığı çalışmada, dolgu morfolojisi ve baskı parametrelerinin DMM ile Kİ yöntemiyle üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve 3B baskılı polimer kompozitlerdeki anizotropi incelenmiştir (Hmeidat, 2020). Mürekkepler, viskozite ayarlayıcısı olarak füme silika partikülleri veya nano-kil trombositleri ve fiber eklentisi olarak ise silisyum karbür (SiC) iplikliler kullanılarak formüle edilmiştir. Mekanik anizotropi, füme silika veya nano-kil

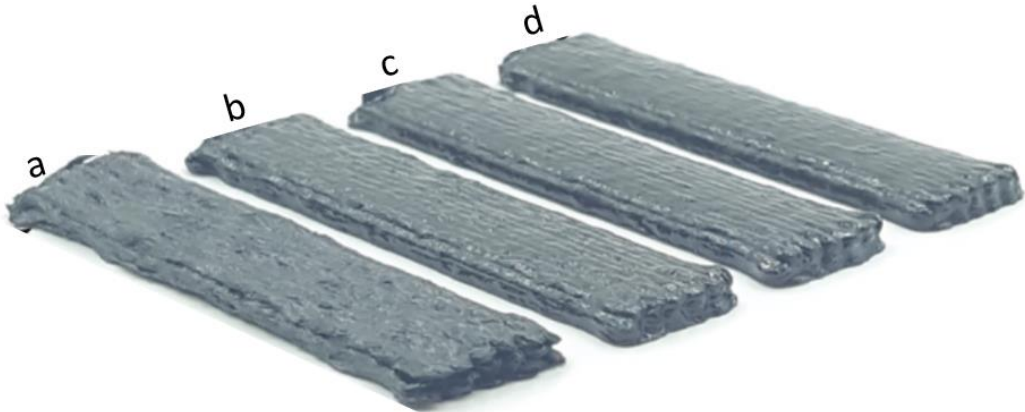
kullanan, SiC iplikleri içeren veya içermeyen epoksi mürekkep formülasyonları için 3-nokta eğme testi ile karakterize edilmiştir. Numuneler üç farklı nozul boyutu kullanılarak üç farklı baskı hızında basılmıştır. Nano-kilin oryantasyonu da küçük ve geniş açılı X-ışını saçılımı kullanılarak karakterize edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, nano-kil veya SiC dolgu maddeleri kullanıldığında daha küçük nozul çaplarının ve daha yüksek biriktirme hızlarının daha fazla anizotropiye yol açtığı görülmüştür.

Hmeidat vd. tarafından sunulan çalışmada fiber uzunluk dağılımı, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler için çok çeşitli mürekkep bileşimleri ve karıştırma süreleri boyunca ölçülmüş ve dağılımlar Weibull tipi bir dağılım fonksiyonuna uydurulmuştur. Fiber uzunluk dağılımının mürekkep işlenebilirliği, mürekkep reolojisi, baskı davranışı ve mekanik özellikler arasındaki denge üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, nozul boyutu ve baskı hızı gibi baskı parametrelerinin 3B baskılı kompozitlerde mekanik anizotropi ve fiber oryantasyon dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Basılı kompozitlerin mekanik özellikleri 3-nokta eğme testi ile karakterize edilmiş ve mikro yapı optik ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve x-ışını bilgisayarlı tomografi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, DMM ile üretilmiş epoksi/KF içeren kompozit mürekkepler için lif uzunluğunun, artan karıştırma süresi ve artan KF içeriği ile azaldığı görülmüştür. Nano-kil trombositleri gibi bir reoloji değiştiricinin KF eklentili mürekkeplere dahil edilmesinin, daha uzun liflerin karıştırma işlemi sürecinde daha uzun süre boyunca kısalmadan kalabilmesini sağladığı görülmüştür. Fiber uzunluk dağılımının iki parametrelili Weibull tipi bir dağılım fonksiyonu kullanılarak oldukça iyi bir şekilde uydurulabileceği bulunmuştur. Karıştırma süresinin hem temel mürekkep hem de KF eklentili mürekkeplerinin reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu belirtilmiştir. Bu mürekkeplerin hem depolama modülü hem de kayma akma geriliminin artan karıştırma süresiyle azaldığı, görünür viskozite ve kayma inceltme davranışının ise karıştırma süresinden bağımsız olduğu görülmüştür. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan 3-nokta eğme testi sonuçları Şekil 1.11’de verilmiştir. Testler sonucunda, KF eklentili kompozitlerinin eğilme dayanımının, azalan fiber uzunluğunun bir sonucu olarak artan karıştırma süresiyle azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte eğilme modülüsünün ise karıştırma süresinden bağımsız olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1.11 : Farklı karıştırma süreleri ile elde edilen mürekkeplerden üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonuçları (Hmeidat, 2021).

Bu çalışma kapsamında daha uzun karıştırma süresi ve daha kısa fiberler ile Şekil 1.12'de görüldüğü üzere daha iyi baskı davranışı ve daha düzgün baskılı yüzeyler elde edilmiştir. Daha küçük nozul boyutları ve daha yüksek baskı hızları ile basılan KF eklentili kompozit numunelerde daha fazla mekanik anizotropiye ve baskı yönü boyunca daha iyi mekanik özelliklere ulaşılmıştır. Bu durum, xCT ölçümleri kullanılarak ölçülen liflerin daha iyi hizalanmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada incelenen malzemeler ve baskı parametreleri için, daha düşük hızlarda veya daha büyük nozullardan basılan ve daha uzun lifler içeren numunelere kıyasla, daha yüksek hızlarda veya daha ince nozullardan daha kısa lifler içeren mürekkepler kullanılarak basılan numunelerde daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir.



Şekil 1.12 : Farklı karıştırma süreleri ile elde edilen mürekkeplerden üretilen numuneler, (a) 180 saniye, (b) 360 saniye, (c) 540 saniye, (d) 720 saniye (Hmeidat, 2021).

Wright vd. çalışmasında, DMM ile Kİ sistemlerinde önemli iki baskı parametresi olan nozul çapı ve HO ile KF eklentili kompozitlerde fiber hizalamasının kontrol edilmesi araştırılmıştır (Wright, 2022). Bunu yapmak için, büyük miktarda fiber hizalama verisini hızlı bir şekilde toplamak için yeni bir hızlı fiber hizalama analizi metodu geliştirilmiştir. Geleneksel fiber hizalama ölçüm tekniği olan X-Ray CT ile karşılaştırıldığında, geliştirilen bu metodun hızlı, doğru ve düşük maliyetli bir alternatif olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında daha küçük nozul çapları ve daha yüksek hız oranları ile baskı yapılarak fiber hizalamasının geliştirilebileceği tespit edilmiştir. Fiberlerin yazdırma doğrultusunda hizalamasının artmasıyla boylamasına eğilme direngenliği ve eğilme dayanımının iyileştiği belirtilmiştir. Düşük fiber hizalaması ile basılan kompozitler izotropik mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, kompozit içindeki fiberlerin hizalanmasının, hizalama yönünde eğilme modülüsünü ve eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

Dickson vd. çalışmasında, eriyik yığıma modellemesi (FDM, *Fused Deposition Modelling*) üretim tekniği kullanılarak üretilen sürekli KF, Kevlar ve cam elyaf eklentili kompozitlerin performansı değerlendirilmiştir (Dickson, 2017). Bu naylon kompozitler Markforged Mark One 3D baskı sistemi kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin mekanik performansı hem çekme dayanımında hem de eğilme dayanımında değerlendirilmiştir. Fiber oryantasyonunun, fiber tipinin ve hacim oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar, hem fiber eklenti içermeyen naylon kontrol numuneleri hem de literatürde bilinen malzemeler ile karşılaştırılmıştır. İncelenen fiberler arasında, KF eklentisinin numunelerin mekanik dayanımlarında en yüksek artışı sağladığı gösterilmiştir. Çekme mukavemeti değerleri, fiber eklentisiz naylon polimer ile elde edilenin 6,3 katına kadar çıkmıştır. KF ve cam elyaf eklentisinin hacim oranı arttıkça, mekanik performansı kötü etkileyen hava kabarcıklarının kompozit matris içindeki oranın da arttığı görülmüştür. Yapılan testler sonucunda, maksimum çekme dayanımına %18 oranında cam elyaf içeren numunelerde ulaşılmış, fiber oranının %33'e kadar çıkarılmasıyla ise çekme dayanımında çok daha az oranda artışlar gözlemlenmiştir.

Camirero vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FDM tekniği ile üretilen 3D baskılı sürekli karbon, cam ve Kevlar fiber takviyeli naylon kompozitlerin darbe performansı üzerinde yapı oryantasyonu, katman kalınlığı ve fiber oranının etkisi

incelenmiştir (Caminero, 2018). Darbe dayanımını belirlemek için Charpy darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Farklı konfigürasyonların kırılma mekaniğini değerlendirmek için kırılan yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Test sonuçları çoğu durumda fiber oranının artmasının darbe dayanımının da artırdığını göstermiştir. Darbe testlerinde cam elyaf eklentili numuneler en yüksek darbe mukavemetini sergilerken KF eklentili numuneler en düşük darbe mukavemetini sergileyerek fiber eklentisiz naylon numunelere benzer performans göstermiştir. Elde edilen sonuçlar fiber eklentili 3B baskılı kompozitlerin sergilediği darbe mukavemetinin normal 3B baskılı termoplastiklerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Chacón vd. çalışmasında, 3B baskılı sürekli fiber eklentili kompozit bileşenlerin mekanik performansı üzerinde yapı yönü, katman kalınlığı ve fiber hacim içeriğinin etkisi incelenmiştir(Caminero, 2018). Basılı numunelerin mekanik tepkisini belirlemek için çekme ve 3-nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Kırılan yüzeylerin SEM görüntüleri, işlem parametrelerinin hasar modları üzerindeki etkilerini belirlemek için değerlendirilmiştir. Sürekli fiber eklentili numuneler fiber eklentisiz olanlara göre daha yüksek mukavemet ve direngenlik değerleri göstermektedir. Sonuçlar, KF eklentili kompozitlerin daha yüksek direngenlik ile en iyi mekanik performansı sergilediğini göstermiştir. Test sonuçları fiber eklenti oranı arttıkça mukavemet ve direngenliğin arttığını göstermiştir. Ancak özellikle Kevlar ve cam elyaf içeren numuneler söz konusu olduğunda, fiber/naylon tabakaları arasındaki zayıf bağlanma ve artan kusur seviyelerinin varlığı nedeniyle, fiber eklenti oranındaki artışın mekanik özelliklerde önemli derecede artışa neden olmadığı belirtilmiştir.

Imeri vd. çalışmasında, fiber türünün, fiber hizalanmasının ve dolgu tipinin Kİ ile üretilmiş sürekli fiber eklentili naylon kompozit numunelerin yorulma özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir(Imeri, 2018). Çeşitli fiber türü, fiber hizalanması ve dolgu tipi bileşimlerine sahip test numuneleri, KF, cam elyaf ve Kevlar ile baskı yapabilen bir 3B yazıcı kullanılarak basılmıştır. Toplanan veriler varyans analizi (ANOVA) ile analiz edilmiştir. Testler sonucunda en yüksek yorulma dayanımı izotropik dolgulu KF eklentili numunelerde görülmüştür.

Tekinalp vd. çalışmasında, kısa fiber (0,2-0,4 mm) eklentili akrilonitril-bütadien-stiren kompozitleri, işlenebilirlikleri, mikro yapıları ve mekanik performansları açısından 3B baskı için bir hammadde olarak araştırılmıştır(Tekinalp, 2014). Çalışma kapsamında 3B baskı ile türetilen numuneler geleneksel sıkıştırma kalıplı kompozitler ile

karşılaştırılmıştır. 3B baskılı numunelerin gerilme dayanımları ve modülüs değerleri sırasıyla %115 ve %700 artmıştır. 3B baskı ile baskı yönünde çok yüksek fiber hizalanmasına sahip numuneler (%91,5'e kadar) elde edilirken, sıkıştırma kalıplama işlemi önemli ölçüde daha düşük fiber hizalanmasına sahip numuneler elde edilmiştir. 3B baskılı kompozitlerde geleneksel sıkıştırma kalıplama tekniğiyle üretilenlere kıyasla nispeten yüksek bir gözeneklilik gözlenmesine rağmen, her ikisinin de karşılaştırılabilir çekme dayanımı ve çekme modülüsü değerleri elde edilmiştir.

### **1.3 Tezin Amacı ve Özgün Değeri**

Tez kapsamında doğrudan mürekkep metodu ve katmanlı üretim ile kompozit malzemeler üretilmiş, aksenal çekme, darbe, 3-nokta eğme ve yorulma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Yeni bir metot olan DMM ile Kİ yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler ve bu malzemelerin aksenal yük dayanımlarının belirlenmesine dair çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Ancak bu metot ile üretilmiş kompozit malzemelerin darbe ve yorulma dayanımlarına dair literatürde çalışma bulunamamıştır.

Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere, Kİ yöntemi ile üretilen termoset kompozitlerde karbon fiber gibi eklentilerin kullanıldığına dair çalışmalar olsa da Kevlar fiberlerin kullanımına dair bir çalışma bulunmamaktadır. Kevlar ve karbon fiber arasında mekanik özellikler açısından önemli farklar bulunmaktadır. Bununla birlikte bu iki temel kompozit eklentisi arasında, termoset kompozit yapıların temel matrisini oluşturan termoset polimerler ile mekanik ve kimyasal etkileşim konusunda da önemli derece farklılıklar vardır. Literatürde, bahsi geçen bu iki farklı fiber eklentisi ile üretilmiş termoset polimer kompozit yapıların mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışma bulunamamıştır. Kevlar fiber kullanılarak KI ile üretilmiş termoset kompozitlere dair tez çalışması bu özelliği ile de önemli bir özgün değere sahiptir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

Doğrudan mürekkep yazma işlemi yönteminin yanı sıra, bu metoda dair üretim parametrelerinin elde edilen kompozit yapıların özellikle dinamik mekanik özellikleri üzerine etkisi yeterince çalışılmamış bir alandır. Yapılan literatür araştırmasında bu alanda yapılmış detaylı bir çalışma bulunamamıştır. Bu tez çalışmaları kapsamında DMM ile Kİ yöntemiyle; nano kil oranı, hız oranı, fiber eklenti oranı, fiber uzunluğu

ve fiber türü gibi üretim parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarıyla üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenerek literatürde bu alanda görülen eksiliğin giderilmesi hedeflenmiştir.







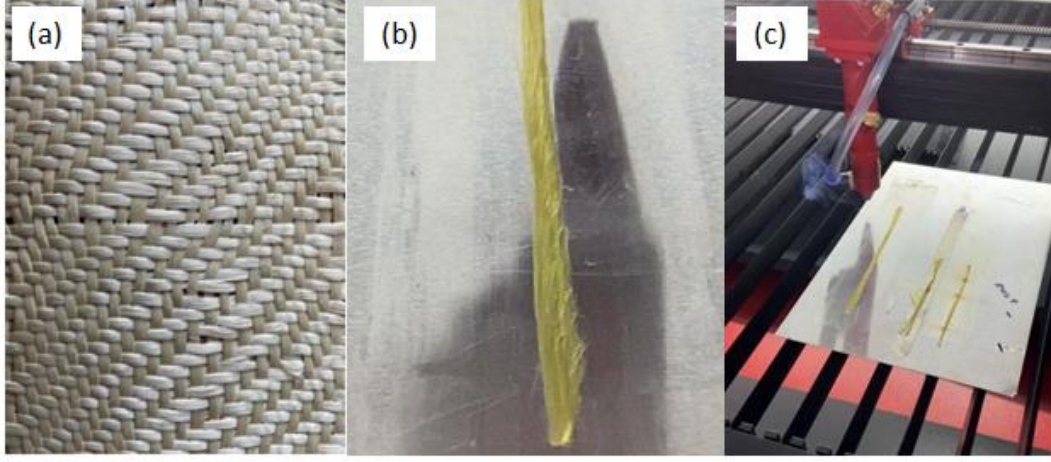
## 2. DENEYSEL YÖNTEM

### 2.1 Mürekkep Üretimi

DMM metodunda kullanılan mürekkep; epoksi, nano-kil, fiber ve epoksi kütleme ajanı olmak üzere 4 bileşenden oluşmaktadır. Epoksi reçine olarak, Hexion, Inc.'den EPON 826 kullanılmıştır (Compton & Lewis, 2014; Hmeidat, 2018; Raney, 2018). Nano-kil, Newtonian reçineye psödoplastisite ve yüksek akma gerilmesi veren, reoloji düzenleyici olarak dahil edilir. Elde edilen yüksek akma dayanımına mürekkep ile kendi kendini destekleyen yapılar oluşturulması sağlanır(Pierson, 2019). Nano-kil olarak, Garamite-7305 kullanılmıştır. KI, biriktirmenin saatler hatta günler alabileceği yavaş bir işlem olabileceğinden, mürekkebin çalışma süresini uzatmak için bir kütleme ajanı gerekir (Compton & Lewis, 2014). Kütleme ajanı olarak Sigma-Aldrich'ten (1-Etil-3-metilimidazolium dikyanamid) epoksi reçine ağırlığının %5'i olacak şekilde karıştırılmıştır. Bu sistem oda sıcaklığında ihmal edilebilir bir sertleşme sergiler ve haftalarca kullanım ömrüne sahiptir(Pierson, 2019). Karbon fiber olarak GM130 karbon fiber (GM 130 PAN, Mitsubishi Chemical Carbon Fiber and Composites) kullanılmıştır.

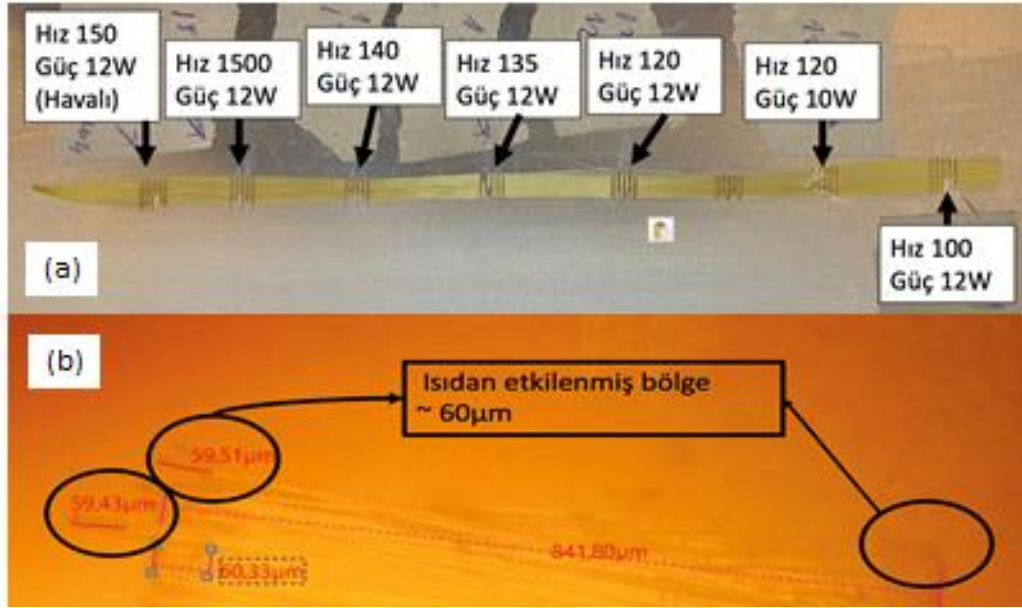
Kesilmiş Kevlar fiberler iki farklı şekilde elde edilmiştir. İlk grup kesilmiş Kevlar fiberler DOST Kimya'dan temin edilen Kevlar kumaşlarından elde edilen Kevlar öbeklerinin Şekil 2.1'de görüldüğü üzere CNC Lazer sistemi ile kesilmesiyle elde edilmiştir. İkinci grup Kevlar fiberler ise 600µm, 800µm, 1000µm uzunluğunda kesilmiş şekilde temin edilmiştir. (AFChina, Şandong, Çin ).

Şekil 2.1a'da görülen örülmüş Kevlar kumaştan tek yönlü fiber sicimleri elde edilerek alüminyum levha üzerine su bazlı yapıştırıcı ile sabitlenerek Şekil 2.1b'de görüldüğü gibi kesim için hazırlanmıştır. Levha Şekil 2.1c'de görüldüğü üzere kesim için CO<sub>2</sub> cam tüplü lazer sistemine sahip kesim platformuna yerleştirilmiş ve farklı kesim parametrelerinde kesim denemeleri yapılmıştır.



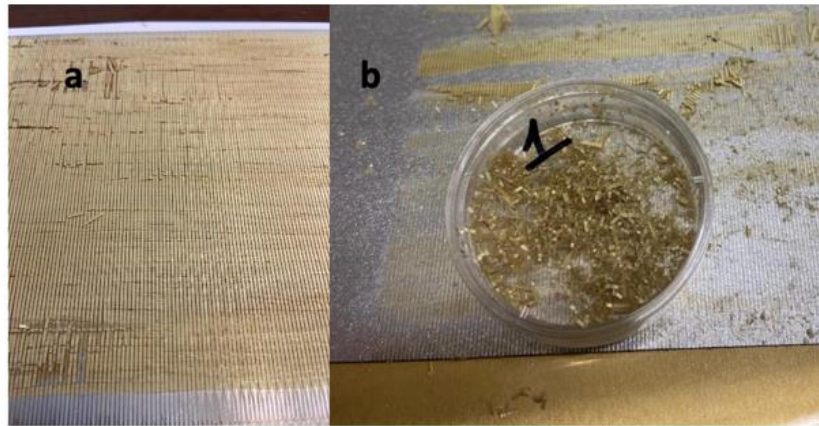
Şekil 2.1: (a) Örülmüş kumaş halinde temin edilen Kevlar örneği, (b) Kumaştan elde edilen fiber siciminin metal levha üzerine yapıştırılması (c) Kevlar siciminin lazer ile kesilmesi.

Yapılan denemelerin sonuçları Şekil 2.2a’da gösterilmiştir. Şekil 2.2a’da görülen denemelerde 10 Watt gücünde yapılan kesimde yetersiz güç nedeniyle sağlıklı bir kesim gerçekleşmediği görülmüştür. Sonraki denemelerde kesim gücü 12 Watt olarak belirlenmiş, kesim hızı artırılarak kesim sırasında fiberlerde gerçekleşen yanmaların minimum seviyeye indirilmesi amaçlanmıştır. Kesim sırasında soğutma amaçlı verilen hava akışının yanmayı arttırdığı gözlemlenmiş ve hava akışı kapatılmıştır. Elde edilen kesilmiş fiberlerin mikroskop altındaki görüntüleri, fiber boyu ve ısıdan etkilenmiş bölgelerin uzunluk ölçümleri Şekil 2.2b’de görülmektedir.

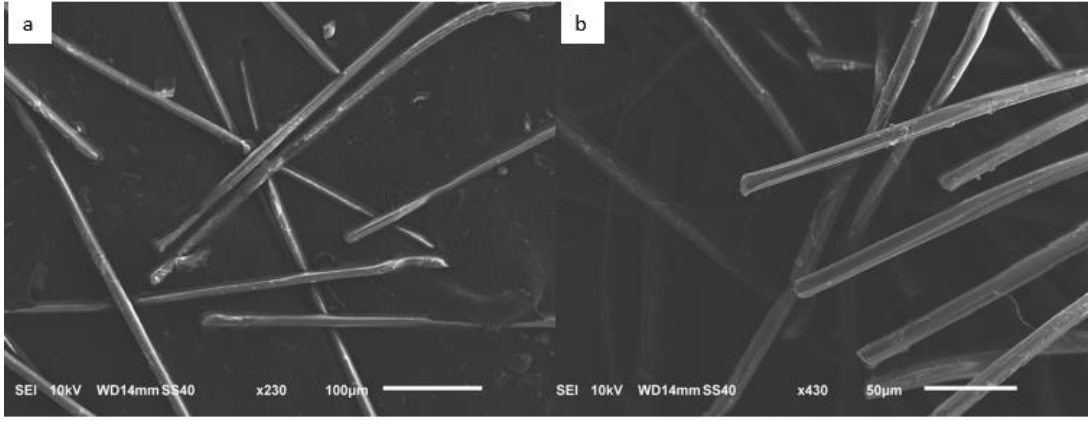


Şekil 2.2: 12 watt parametreleriyle yapılan kesim örneğinin mikroskop görüntüsü.

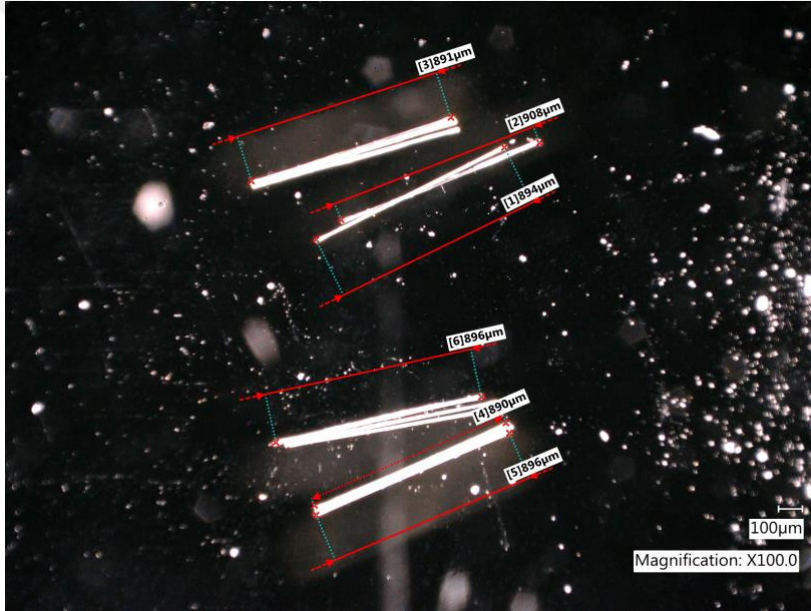
Alüminyum levha üzerine su bazlı yapıştırıcı ile yapıştırılan ve lazer ile kesilen numuneler University of Miami'de levhalar üzerinden Şekil 2.3b'de görüldüğü gibi toplanmıştır. Elde edilen fiberlerin SEM görüntüleri Şekil 2.4'te verilmiştir. Fiberler Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere optik mikroskop ile de görüntülenmiş ve boyut ölçümü gibi yapılmıştır. Fiber örneklerinin ölçülen uzunlukları Çizelge 2.1'de verilmiştir ve ortalama fiber uzunluğu 895,8  $\mu\text{m}$  bulunmuştur.



Şekil 2.3 : a. Kesim sonrası Kevlar fiberler b. Levha üzerinden Kevlar fiberlerin toplanması



Şekil 2.4 : Lazer ile kesilmiş Kevlar fiberlerin SEM görüntüleri, (a)x230 büyütme, (b)x430 büyütme



Şekil 2.5 : Fiberlerin optik mikroskop altında görüntüleri ve uzunluk ölçümleri

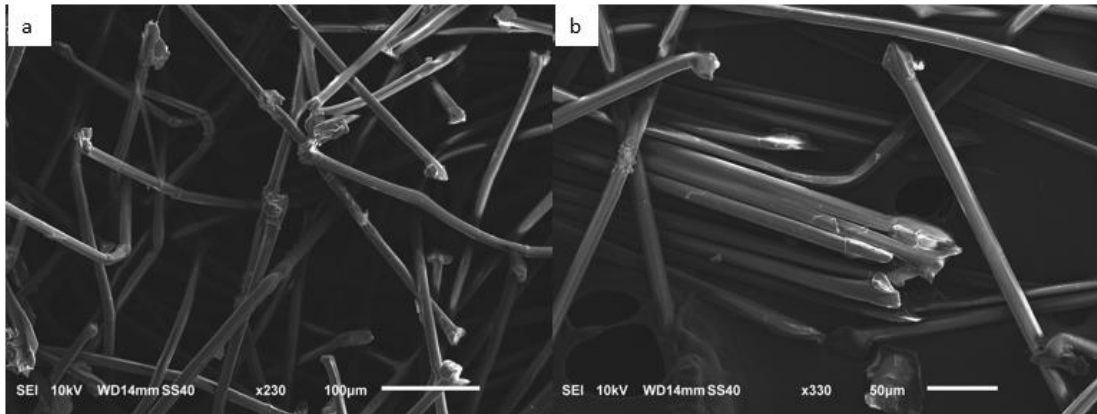
Çizelge 2.1 : Lazer ile kesilmiş Kevlar fiberlerin uzunluk ölçümleri

#	Fiberlerin uzunlukları ( $\mu\text{m}$ )
1	894
2	908
3	891
4	890
5	896
6	896
<b>Ortalama</b>	<b>895,8</b>
<b>Standart Sapma</b>	<b>6,5</b>

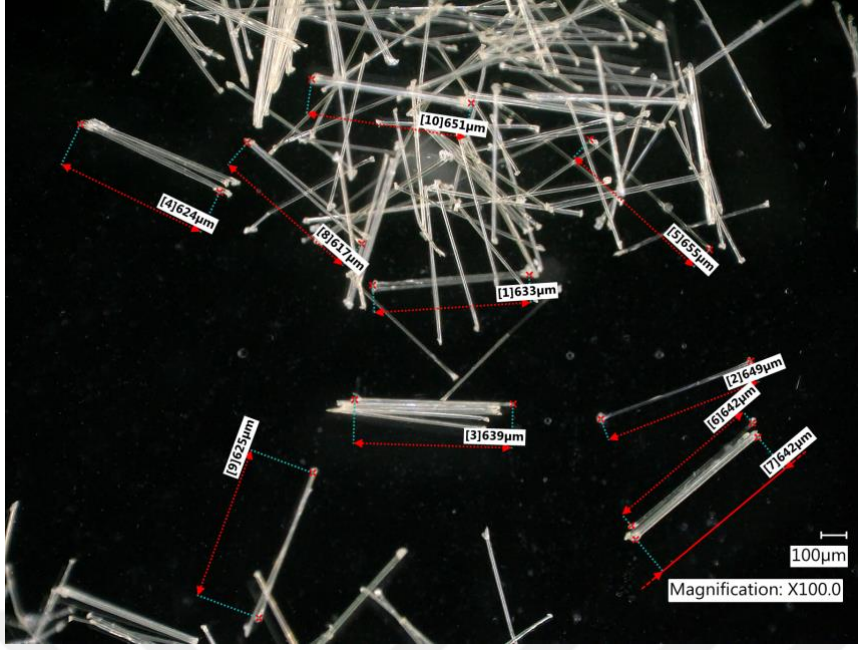
Kesilmiş olarak temin edilen 600 $\mu\text{m}$ , 800 $\mu\text{m}$  ve 1000 $\mu\text{m}$  uzunluklarda kesilmiş Kevlar fiberlerin SEM görüntüleri Şekil 2.6’da görülmektedir. 600 $\mu\text{m}$ , 800 $\mu\text{m}$  ve 1000 $\mu\text{m}$  uzunlularındaki fiberlerin optik mikroskop görüntüleri ve uzunluk ölçümleri sırasıyla

Şekil 2.7,

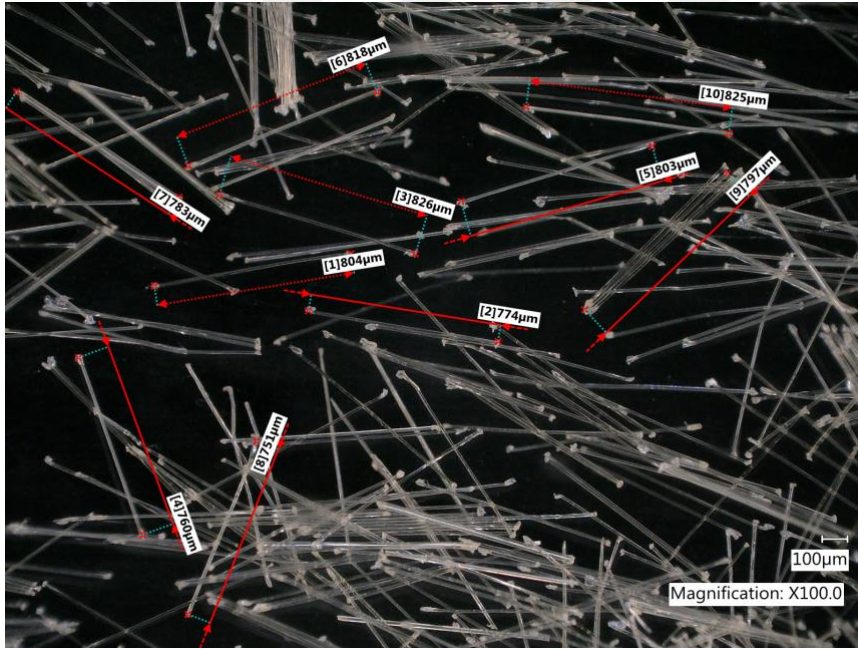
Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da verilmiştir.



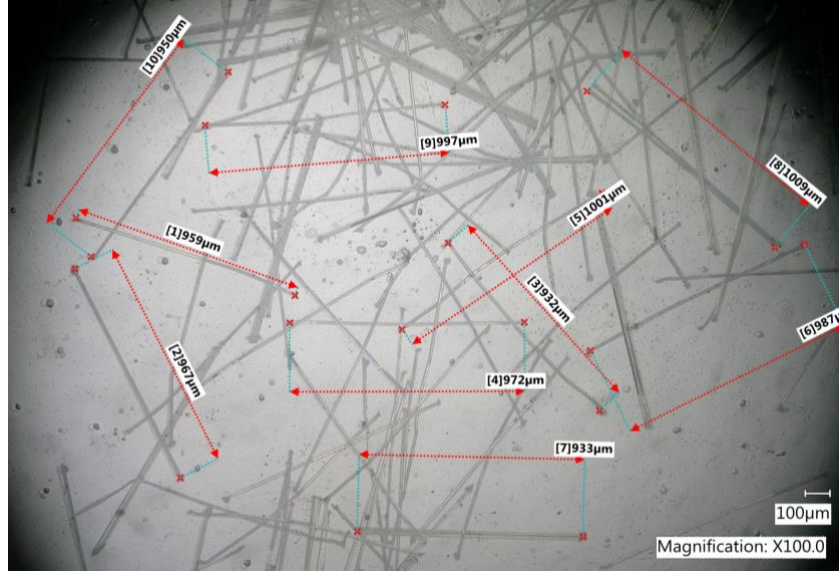
Şekil 2.6 : Kesilmiş olarak temin edilen Kevlar fiberlerin SEM görüntüleri, (a)x230 büyütme, (b)x330 büyütme



Şekil 2.7 : 600µ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 2.8 : 800µ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 2.9 : 1000µ fiberlerin optik mikroskop görüntüleri

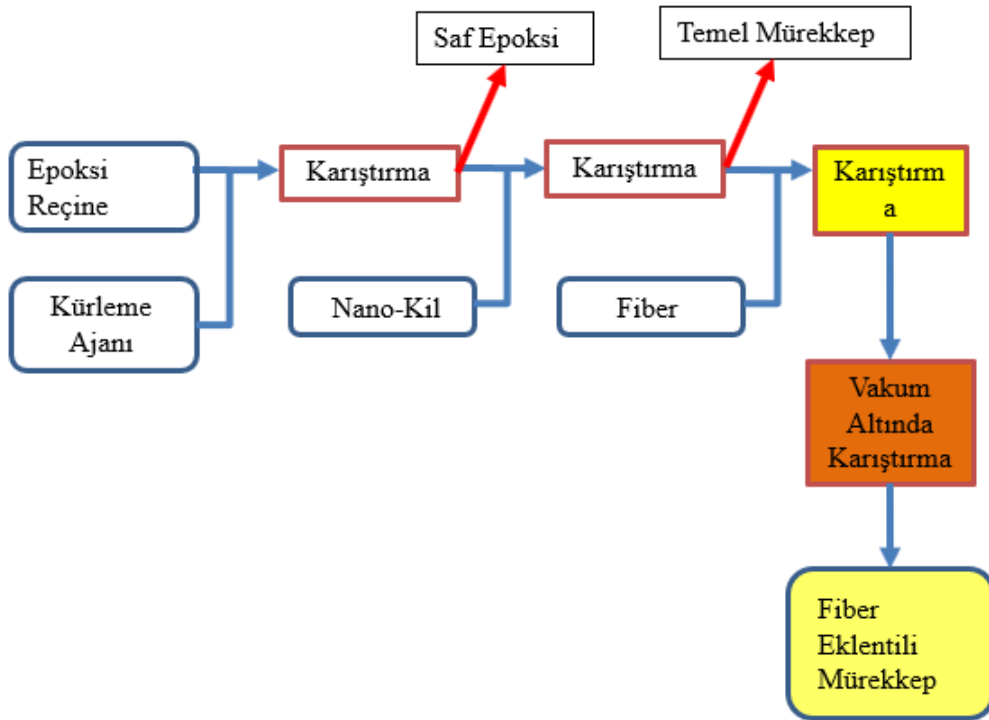
Fiber örneklerinin ölçülen uzunlukları ve ortalama uzunluk değerleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Kesilmiş olarak temin edilen fiber örneklerinin uzunlukları ve ortalama uzunluk değerleri

#	600µm fiber	800µm fiber	1000µm fiber
1	633	804	959
2	649	774	967
3	639	826	932
4	624	760	972
5	655	803	1001
6	642	818	987
7	642	783	933
8	617	751	1009
9	625	797	997
10	651	825	950
<b>Ortalama</b>	637,7	794,1	970,7
<b>Standart Sapma</b>	12,7	26,4	27,6



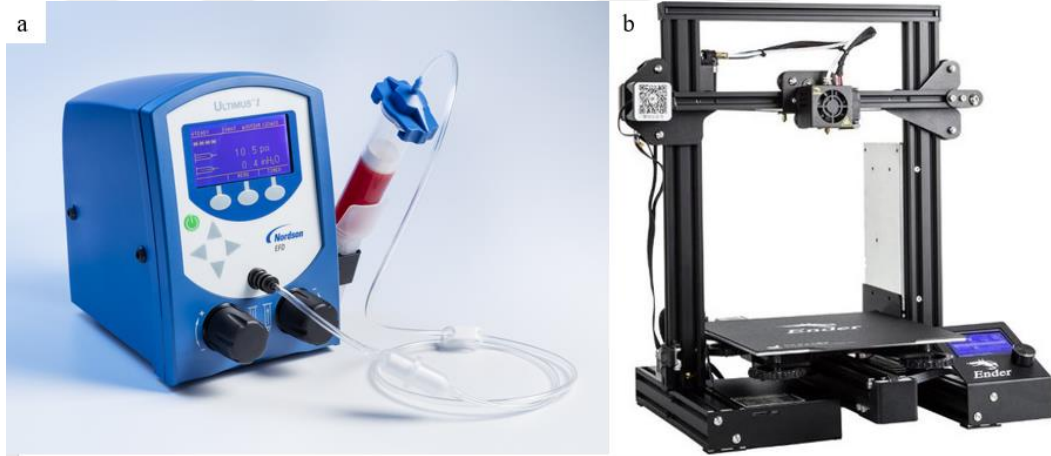
Belirlenen mürekkep bileşenleri ile mürekkep hazırlama aşamaları Şekil 2.10'da görülmektedir. İlk adımda epoksi reçine içerisine, ağırlığının %5'i oranında kütleme ajanı eklenmiştir. Karışım, tüm karıştırma işlemlerinin gerçekleştirildiği yüksek parçalayıcı karıştırıcıda (Thinky ARE-310) 1300 devir/dakika hızda 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Karışıma hacimsel olarak istenilen oranda nano-kil eklenerek bir önceki basamaktaki gibi karıştırılmıştır. Elde edilen fiber içermeyen bu mürekkep aşamasına temel mürekkep adı verilmiştir. Temel mürekkep karışımına istenilen oranda fiber eklenerek karıştırma işlemi yeniden uygulanmıştır. Fiber miktarına bağlı olarak fiber ekleme ve karıştırma işlemi tek adımda değil iki veya daha çok adımda yapılmıştır. Karıştırma işlemlerinden sonra mürekkep ısısının yükselmemesine dikkat edilmiştir. Fiber ekleme işlemleri sırasında karışımın soğutulmasına dikkat edilmiştir. Mürekkep karışımı hazırlandıktan sonra vakum altında son karıştırma işlemi uygulanmıştır. Mürekkep karışımının, vakumlanabilir bir kap içerisinde vakumlanarak yeniden karıştırılması işlemi, tüm diğer karıştırma işlemleri sırasında mürekkep içerisine giren ve hapsolan hava kabarcıklarının giderilmesi için uygulanmıştır.



Şekil 2.10: Mürekkep hazırlama sürecinin şematik gösterimi.

## 2.2 DMM ile Kİ

DMM için tasarlanan yazıcı sistemi 3 eksen hareket sistemi ve mürekkep ekstrüzyon sistemi olarak 2 temel bileşenden oluşmaktadır. 3 eksende hareket amacıyla pozisyon kontrolü yapmaya ve g-kodları ile üretime imkan veren 3B yazıcı (Şekil 2.11b) (Creality 3B Ender 3 Pro) kullanılmıştır. Kullanılan yazıcı sisteminin ikinci bileşeni, mürekkep karışımının belirlenen miktarda ve sürekli akış sağlanacak şekilde baskı bölgesine aktarılmasını sağlayan basınç kontrollü (Şekil 2.11a) (Nordson Ultimus-I) mürekkep ekstrüzyon sistemidir. 3B yazıcıya yerleştirilen şırınga, yazıcı sistemi ve üretilen g-kodları ile kontrollü bir şekilde hareket ettirilebilmektedir. Şırınga içerisindeki mürekkep ise basınç kontrollü dağıtıcı tarafından sağlanan kontrollü hava basıncı ile ekstrüde edilebilmiştir. 3B yazıcılar için oluşturulan temel g-kodları ile kontrol edilebilen baskı işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11 : DMM ile üretim için temel sistem bileşenleri (a) Basınç kontrollü hava dağıtıcı ve şırınga (b) 3 eksende hareket kontrol sistemi.

Hazırlanan mürekkep karışımı Şekil 2.12a'da görüldüğü üzere şırınga içerisine dikkatlice doldurulmuştur ve Şekil 2.12b'de görüldüğü şekilde 3B yazıcıya yerleştirilmiştir. 3B yazma işleminden önce yazma hızının hesaplanabilmesi için hazırlanan mürekkebin nozuldan çıkış hızının ölçülmesi gerekmektedir. Mürekkebin nozuldan çıkış hızı ( $V_m$ ), 10 saniyede ekstrüde edilen mürekkep miktarı ( $M_{10s}$ ), nozul çapı ( $R$ ) ve mürekkep yoğunluğu ( $D_m$ ) kullanılarak Eşitlik (2.1)'e göre yapılır.

$$V_m = \frac{4 \cdot \frac{M_{10s}}{10}}{\pi R^2 \cdot D_m} \quad (2.1)$$

Mürekkep yoğunluğu ( $D_m$ ) ise mürekkep içeriğindeki bileşenlerin yoğunluk değerleri ve hacimsel karışım oranı (HKO) değerleri kullanılarak Eşitlik (2.2)'e göre hesaplanır. Eşitlik (2.2)'de  $D_e$ ,  $D_f$ ,  $D_n$ ,  $D_k$  sırasıyla epoksi reçine, fiber, nano-kil ve kürlenme ajanının malzeme yoğunluğunu;  $H_{\%e}$ ,  $H_{\%f}$ ,  $H_{\%n}$ ,  $H_{\%k}$  ise sırasıyla epoksi reçine, fiber, nano-kil ve kürlenme ajanının bileşim için belirlenen HKO değerlerini ifade etmektedir. Mürekkep bileşenlerinin malzeme yoğunlukları Çizelge 2.3'de verilmiştir.

$$D_m = D_e \cdot H_{\%e} + D_f \cdot H_{\%f} + D_n \cdot H_{\%n} + D_k \cdot H_{\%k} \quad (2.2)$$

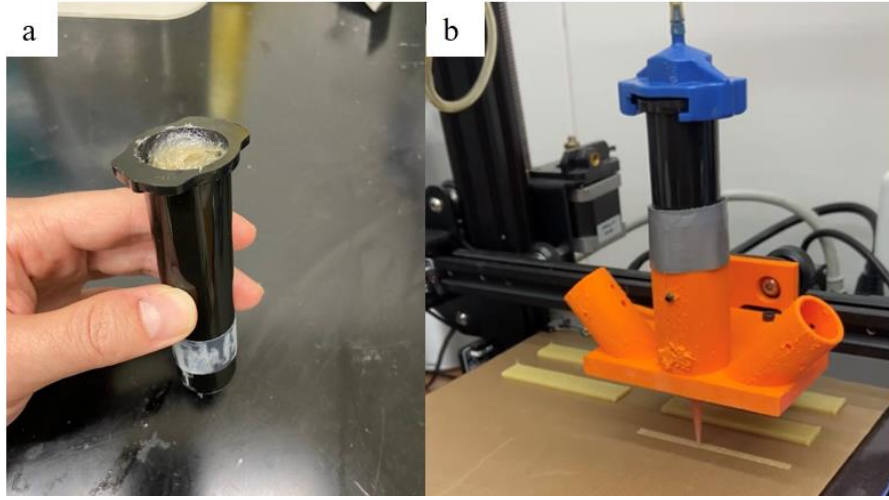
Çizelge 2.3 : Mürekkep bileşenlerinin yoğunlukları.

<b>Mürekkep bileşeni</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Epoksi reçine</b>	1.16
<b>Kevlar</b>	1.44
<b>KF</b>	1.8
<b>Nano-kil</b>	1.98
<b>Kürleme ajanı</b>	1.06

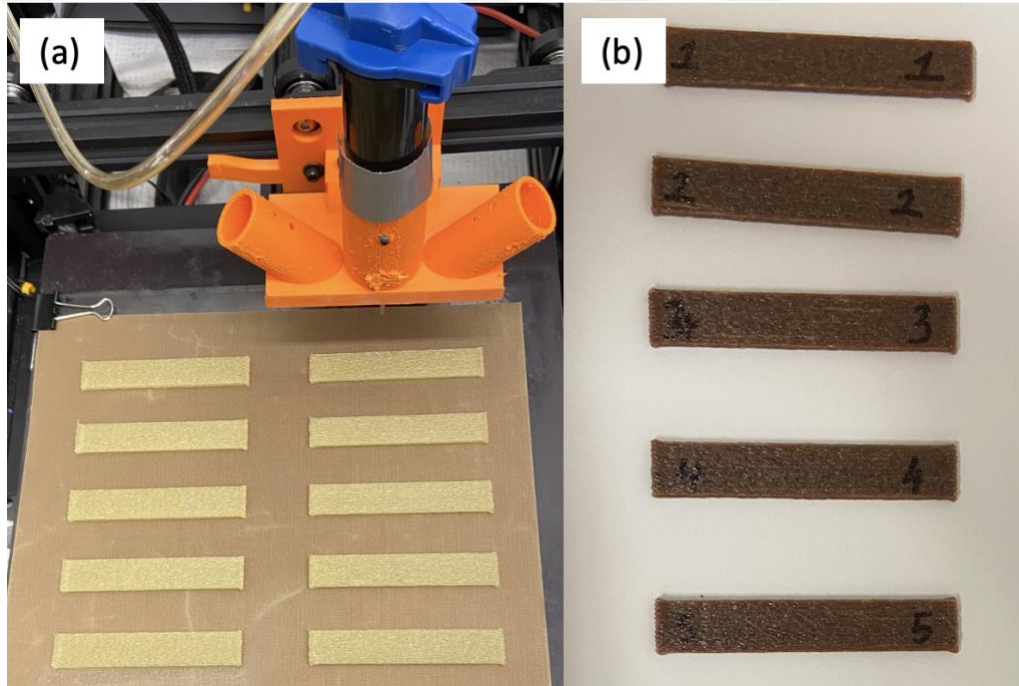
DMM sistemleri için önemli bir baskı parametresi olan HO kısaca yazdırma hızının, mürekkep çıkış hızına oranı şeklinde ifade edilebilir. Literatürde HO'nun DMM ile fiber takviyeli kompozit üretiminde, fiber yerleşim oranına etki eden önemli faktörlerden olduğu belirtilmiştir (Wright, 2022). Temel 3B baskı parametrelerinden olan yazdırma hızı ( $V_p$ ) ise HO ( $VR$ ) ve mürekkep çıkış hızı ( $V_m$ ) ile Eşitlik (2.3)'te ifade edildiği şekilde hesaplanabilir.

$$V_p = VR \cdot V_m \quad (2.3)$$

Şekil 2.12b'de görüldüğü üzere yazma alanı teflon kumaş ile kaplanarak yazma işlemini takip eden kürlenme işlemi sonrasında numunelerin baskı yüzeyinden daha kolay bir şekilde ve zarar görmeden toplanması sağlanmıştır. Nozul çapı, yazdırma hızı gibi parametreler belirlendikten sonra elde edilen g-kodları ile yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yazma işlemi tamamlandıktan Şekil 2.13a'da görülen numuneler, DMM ile üretimin son basamağı olan kürlenme işlemi için fırına yerleştirilmiştir. 100°C sıcaklıkta 15 saat boyunca kürlenme işlemine tabi tutulan numunelerin üretim aşaması tamamlanmış olmaktadır ve nihai ürünler Şekil 2.13b'de görülmektedir.



Şekil 2.12 :(a) Mürekkebin şırıngaya doldurulması ve (b) şırınganın 3B hareket sistemine yerleştirilmesi.



Şekil 2.13 :Kürleme öncesi(a) ve sonrası(b) numuneler.

## 2.3 Mekanik Testler

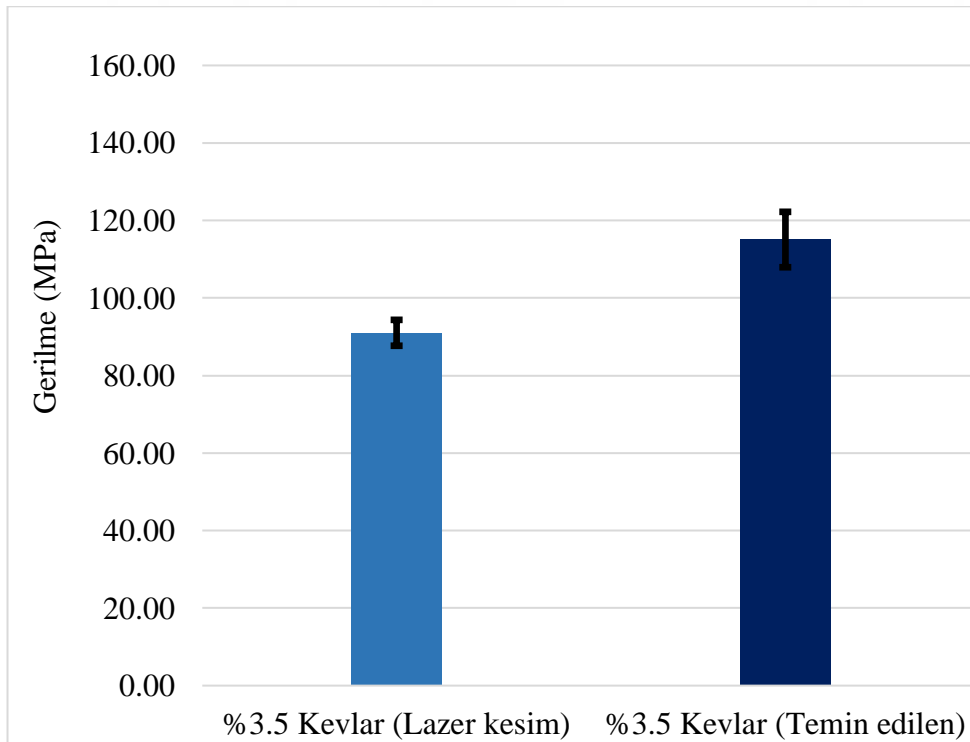
### 2.3.1 Temin edilen Kevlar fiberlerin karşılaştırılması ve mürekkep hazırlama sürecinin iyileştirilmesi

Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen Kevlar fiberler kullanılarak üretilen numuneler, 3-nokta eğme testi yapılarak karşılaştırılmıştır. Test sonucunda elde edilen ortalama eğilme dayanımı ve eğilme gerinimi değerleri Çizelge 2.4'te

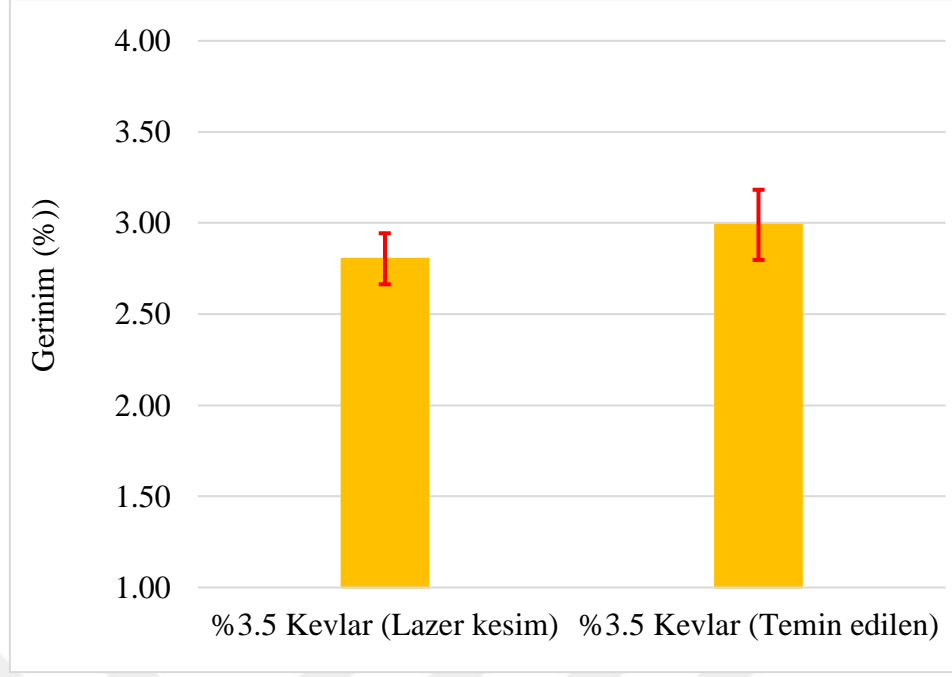
verilmiştir. Test gruplarına ait eğilme dayanımları Şekil 2.14'te, eğilme gerinimi değerleri Şekil 2.15'te grafikler ile ifade edilmiştir. Kesilmiş olarak temin edilen fiberler ile üretilen numuneler daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Lazer kesim ile üretilen kesilmiş Kevlar fiberlerde görülen fiber demetlerinin (Nawafleh, 2020), bu fiber ile üretilen numunelerin daha düşük eğilme dayanımı göstermesinde etkili olmuştur.

Çizelge 2.4 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen Kevlar fiberler kullanılarak üretilen numunelerin 3-nokta eğme testi sonucunda elde edilen ortalama eğilme dayanımı ve eğilme gerinimi değerleri

Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)	Hasar Gerinmesi (%)
<b>%3,5 Kevlar (Lazer kesim)</b>	91.03	115.09
<b>%3,5 Kevlar (Temin edilen)</b>	2.80	2.99



Şekil 2.14 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen fiber ile üretilen numunelerin 3- nokta eğme dayanımları.

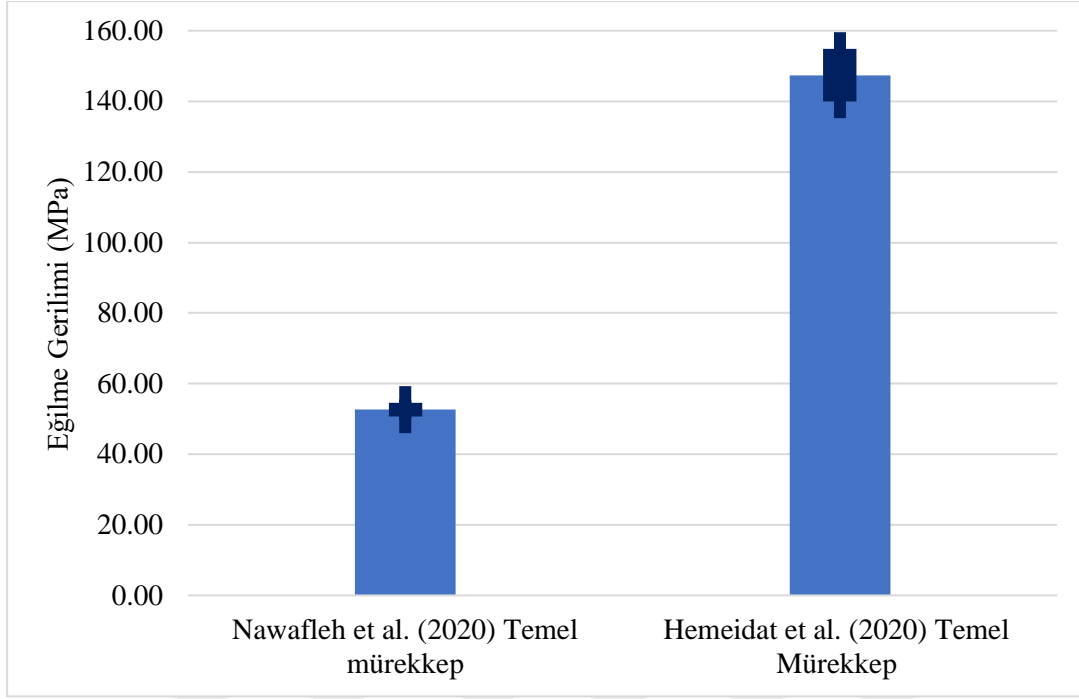


Şekil 2.15 : Lazer kesim ile üretilen ve kesilmiş olarak temin edilen fiber ile üretilen numunelerin 3- nokta eğme gerinim değerleri.

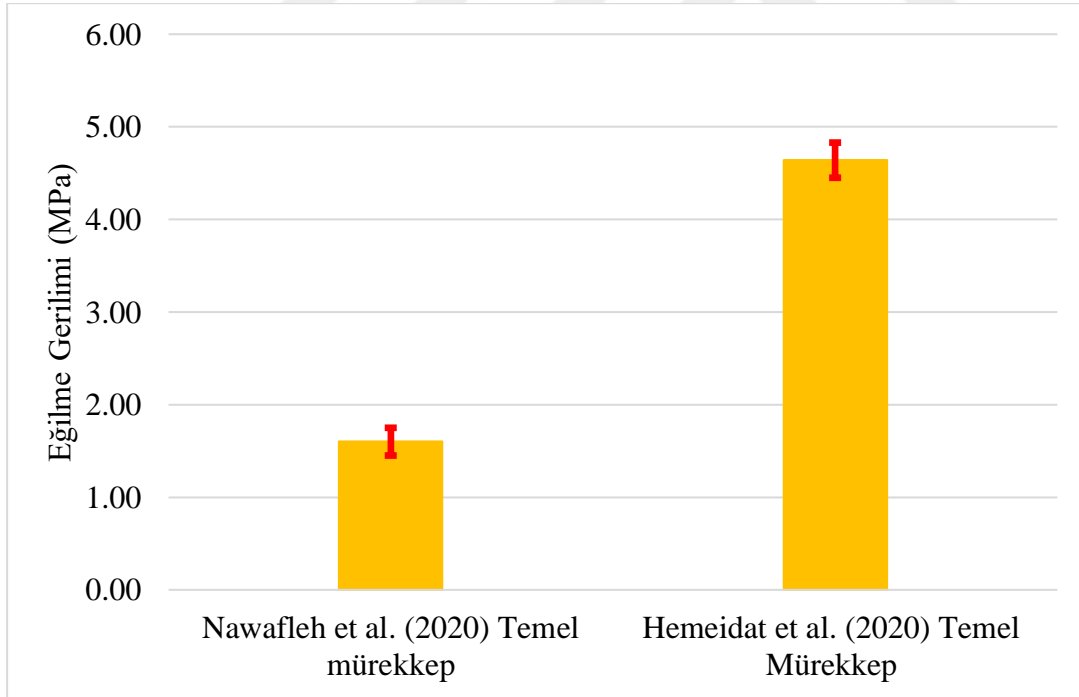
Hmeidat ve arkadaşlarının (2020) çalışmasında elde edilen temel mürekkep numunelerinin 3-Nokta eğme sonuçları ve tez kapsamında gerçekleştirilen ilk çalışma sürecinde üretilen numunelerin (Nawafleh, 2020) 3-nokta eğme sonuçları Çizelge 2.5'te verilmiştir. İki çalışmada elde edilen numunelerin eğilme dayanımları Şekil 2.16'da, eğilme gerinim değerleri Şekil 2.17'de grafikler ile ifade edilmiştir. İki çalışma kıyaslandığında Hmeidat ve arkadaşlarının numunelerinin daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Her iki çalışmada kullanılan mürekkep hazırlama tekniklerinin şematik ifadeleri Şekil 2.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 : Nawafleh vd.(2020) ve Hmeidat vd.(2020) çalışmasında üretilen mürekkep numunelerinin ortalama 3-Nokta eğme gerilme ve gerinim değerleri.

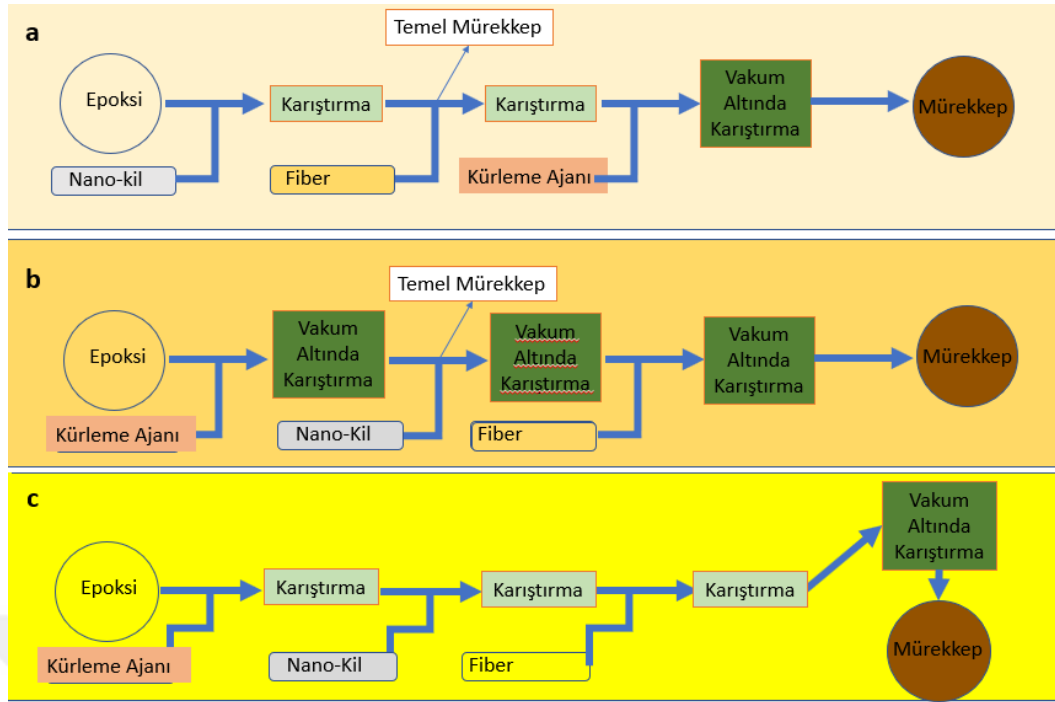
Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)	Hasar Gerinmesi (%)
<b>Nawafleh vd. (2020) temel mürekkep</b>	52,63	147,40
<b>Hmeidat vd. (2020) temel mürekkep</b>	1,60	4,64



Şekil 2.16 : Nawafleh vd. ve Hmeidat vd. çalışmalarında elde edilen 3-nokta eğme dayanımları.



Şekil 2.17 : Nawafleh vd. ve Hmeidat vd. çalışmalarında elde edilen 3-nokta eğme gerinim değerleri.



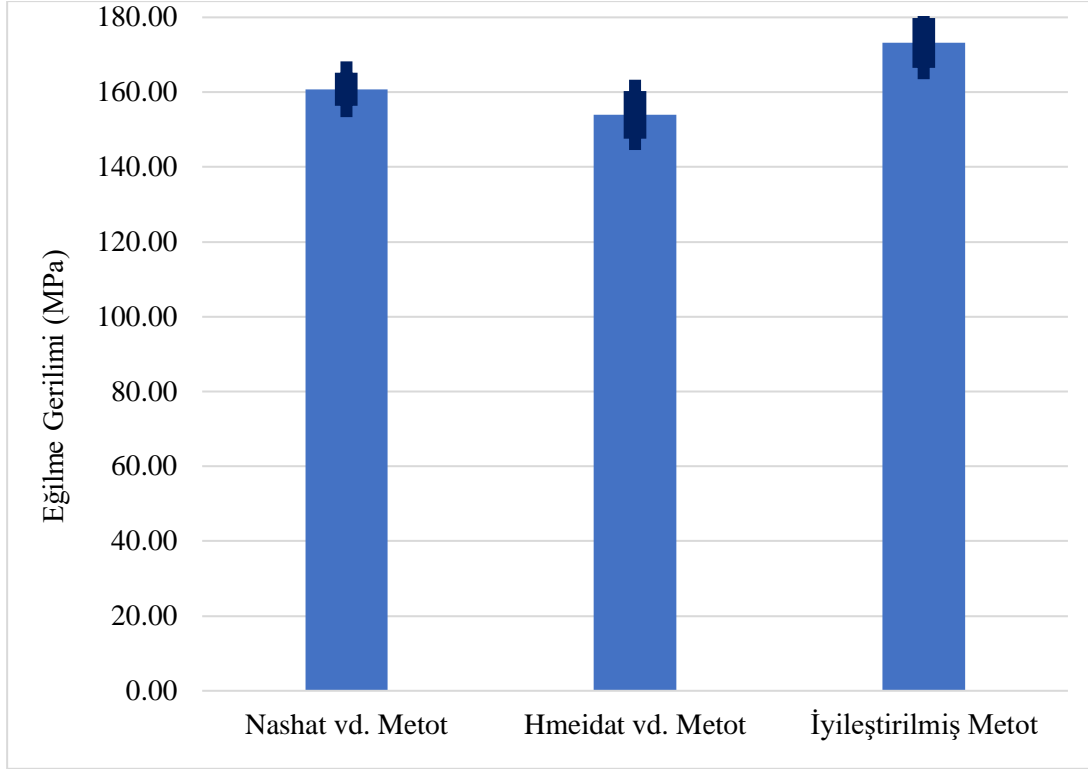
Şekil 2.18 : (a) Nawafleh vd. çalışmasında kullanılan, (b) Hmeidat vd. çalışmalarında kullanılan ve (c) iyileştirilmiş mürekkep hazırlama metodu.

Daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaşan çalışmada küreleme ajanının karışıma ilk eklenen bileşen olduğu görülmüştür. Bu farklılık göze alınarak, küreleme ajanının ilk adımda eklendiği ve fiber karışımı kolaylaştırması için vakum işleminin sadece son basamakta uygulandığı Şekil 2.18c'de de görülen iyileştirilmiş mürekkep hazırlama süreci ile numuneler üretilerek mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan 3-nokta eğme testi sonuçları Çizelge 2.6'da verilmiştir ve Şekil 2.19'da grafik olarak ifade edilmiştir. İyileştirilmiş metot ile üretilen numunelerin daha yüksek ortalama eğilme dayanımı değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Çizelge 2.6 : Karşılaştırılan mürekkep üretim metotlarıyla üretilen numunelerin 3-nokta eğme dayanımları

Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)
Nawaflef vd. metodu	160,78
Hmeidat vd. metodu	153,94
İyileştirilmiş metot	173,16

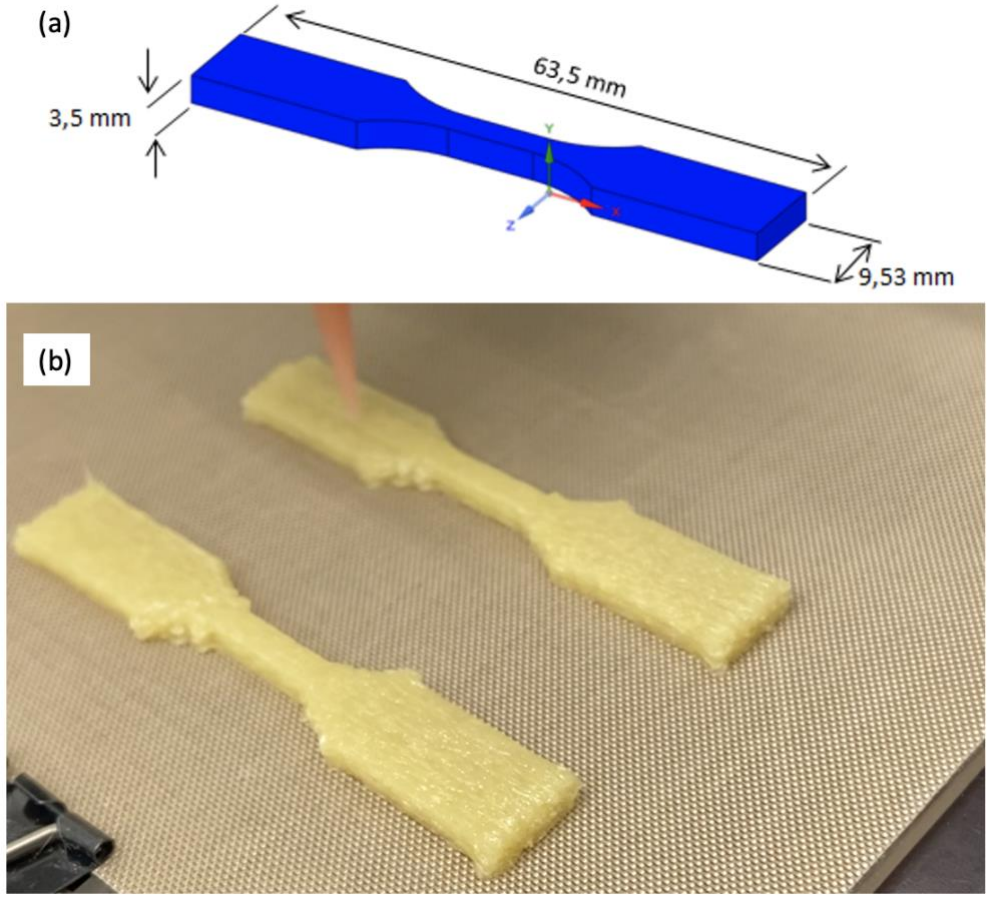




Şekil 2.19 : Nawafleh vd. metodu, Hmeidat vd. metodu ve iyileştirilmiş mürekkep hazırlama metodu ile üretilmiş numunelerin 3-nokta eğme dayanımları

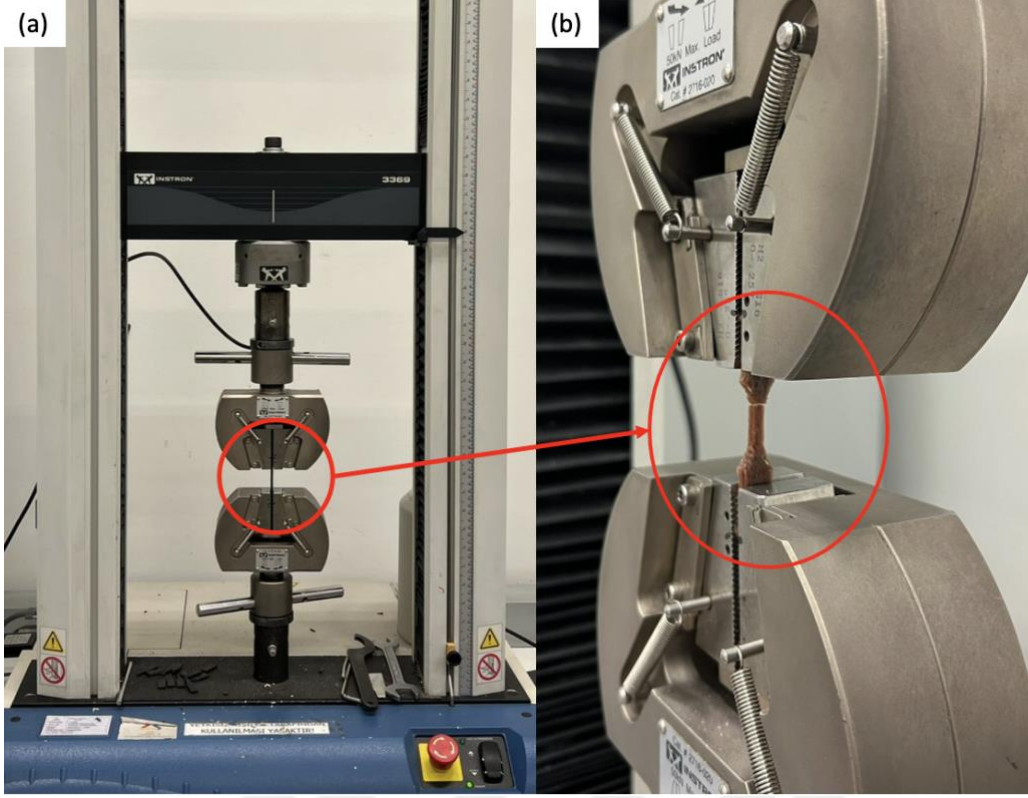
### 2.3.2 Çekme testi

Çekme testlerinin gerçekleştirilebilmesi için ASTM D638 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) standardına göre Şekil 2.20a'da görülen numune tasarımı yapılmıştır. Numunelerin üretimi, taşınması ve test edilmesi esnasında oluşabilecek olumsuzlukları en aza indirebilmek için ilgili standartta belirtilen Tip 5 numune tasarımı gerçekleştirilmiştir. Belirlenen tasarıma uygun olarak DMM ile üretilen numuneler Şekil 2.20b'de görülmektedir.



Şekil 2.20 :Çekme testi numuneleri (a) Çekme numunesi tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan çekme numuneleri.

Çekme testleri Şekil 2.21’de görülen TOBB ETÜ malzeme karakterizasyon laboratuvarında bulunan INSTRON marka çekme cihazında 2 KN yük hücresi kullanılarak yapılmıştır. Test numunesi Şekil 2.21b’de görüldüğü üzere çenelere bağlanmıştır. ASTM D638 standardında belirtildiği üzere testlerde çene ilerleme hızı 1 mm/dakika olarak belirlenmiştir.



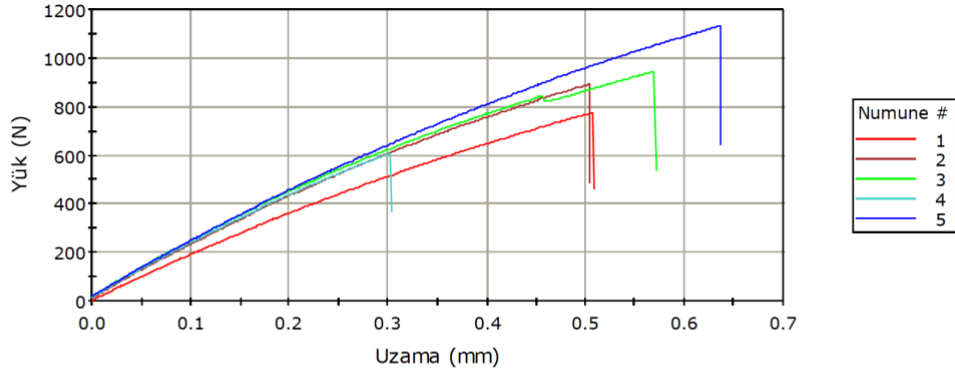
Şekil 2.21 : Çekme test düzeneği (a) genel görünüş (b) numunenin çenelere bağlanması.

Testler sonucunda her bir test grubu için Şekil 2.22’de görüldüğü üzere yük- yer değiştirme grafiği ve maksimum yük ve uzama değerlerini içeren Çizelge, test cihazı yazılımından alınmıştır. Çekme gerilmesi ( $\sigma$ ) değeri Eşitlik (2.4)’te ifade edildiği üzere numuneye uygulanan yükün ( $P$ ), numunenin test öncesi kesit alanına( $A$ ) bölünmesiyle elde edilmiştir(ASTM International, 2015). Çekme gerinimi ( $\epsilon$ ) değeri ise Eşitlik (2.5)’te ifade edildiği üzere yer değiştirme değerinin ( $\delta$ ), numunenin test öncesi ölçüm bölgesi uzunluğuna( $L$ ) bölünmesi ile elde edilmiştir. Numune çekme dayanımı, elde test sırasında edilen en yüksek yük değeri ile hasar anındaki çekme gerinimi ise en yüksek yük anındaki gerinim değeri ile elde edilmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.5)$$

Numune 1 ile 5 arası

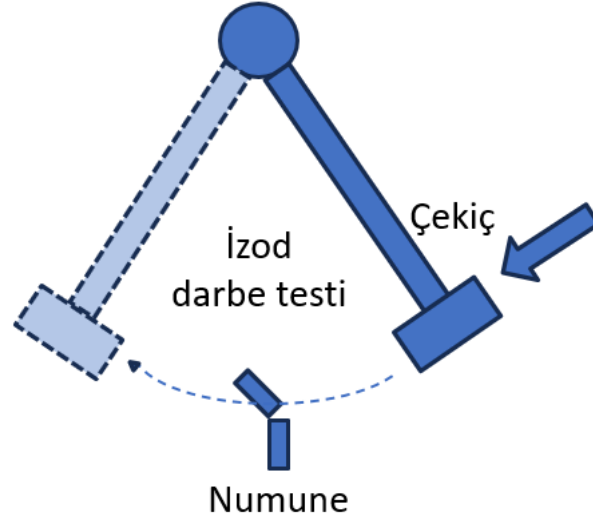


	Yükde Maximum Load (N)	Uzamada Maximum Load (mm)	Yükde Yield (Offset 0.002 mm) (N)	Uzamada Yield (Offset 0.002 mm) (mm)
1	774,88455	0,50837	213,09567	0,11260
2	891,36250	0,50469	249,60999	0,10756
3	944,20100	0,57025	267,24514	0,10831
4	606,10748	0,30169	183,96824	0,07391
5	1130,65988	0,63644	303,30789	0,12529
Ortalama	869,44308	0,50429	243,44539	0,10553
Standart Sapma	195,31409	0,12538	46,49351	0,01905

Şekil 2.22 : Çekme testi sonuçlarını içeren yük-yer değiştirme grafiği ve test sonuçları tablosu.

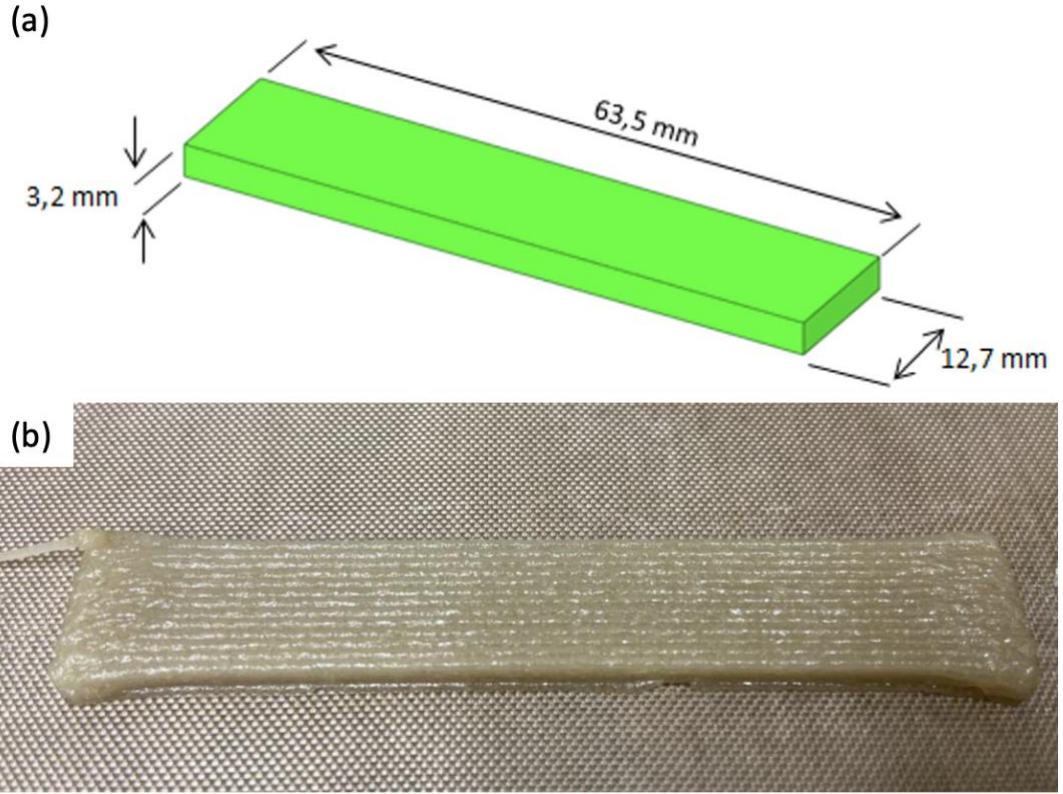
### 2.3.3 Darbe testi

Darbe testleri için ASTM D4812 (Standard Test Method for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics) standardı belirlenmiştir. Bu test standardı, diğer darbe testi standartlarından numunelerde çentik içermeme noktasında ayrılmaktadır. Çentik ihtiyacının olmaması ASTM D4812 standardını, özellikle fiber eklentili numunelerin test edilmesinde çok kullanışlı hale getirmektedir (ASTM, 2022). Şekil 2.23'te şematik olarak gösterilen darbe testi; test düzeneğine monte edilmiş, standartlaştırılmış bir sarkaç tipi çekiç tarafından sarkaç salınımı ile numuneye iletilen enerji ile numunenin kırılması sırasında, numunenin kırılmaya karşı gösterdiği direncinin belirlenmesine dayanır.



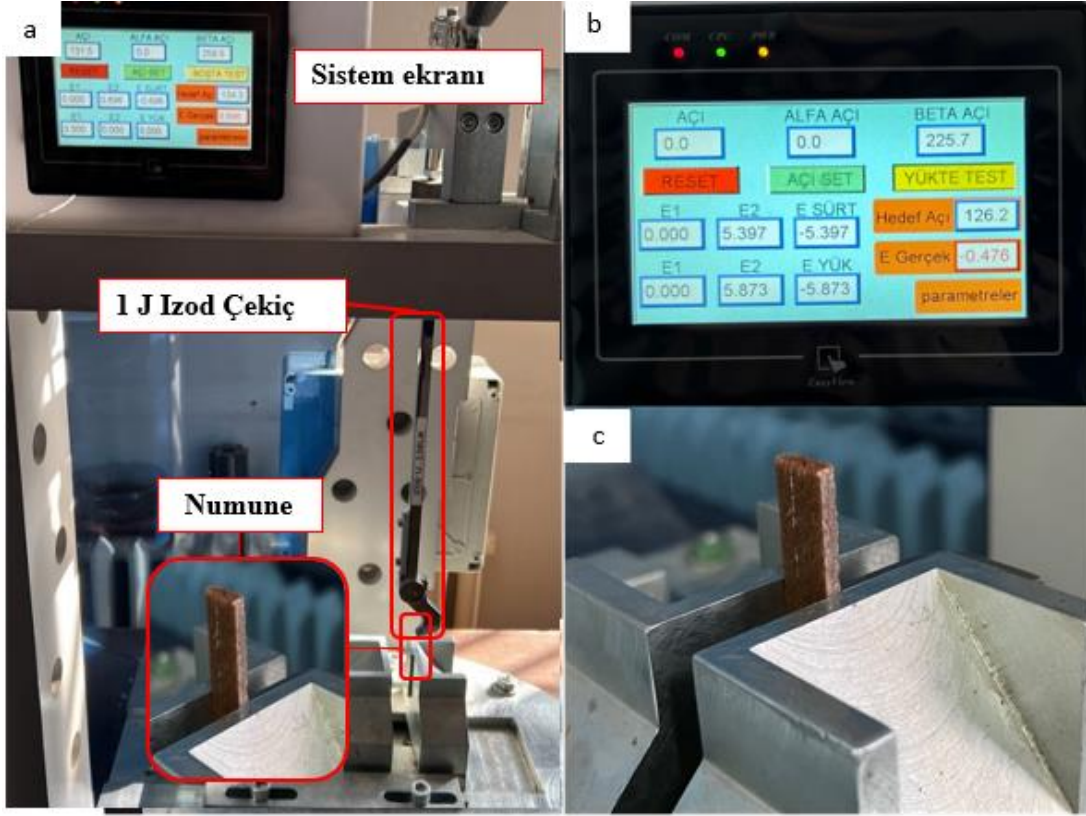
Şekil 2.23 : Darbe test şematik gösterimi

Belirli bir yükseklikten sarkaç hareketi yapacak şekilde serbest bırakılan çekicinin sahip olduğu potansiyel enerji, salınım sırasında kinetik enerjiye dönüşür. Çekicinin test numunesini kırması sırasında, sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı numune tarafından sönmülenir. Salınımına devam eden çekicinin enerjisinin yeniden potansiyel enerjiye dönüşmesiyle test döngüsü tamamlanmış olur. Çekicinin test öncesi salınım başladığı yükseklik ile son olarak ulaştığı yükseklik değerlerinin farkı üzerinden, test numunesinin sönmülediği enerji hesaplanır. Sarkaç sisteminde sürtünmeden kaynaklı kaybedilen enerjinin de test öncesinde belirlenerek hesaplamalar sırasında dikkate alınır. Bu standarda göre Şekil 2.24a'da görülen numune tasarımı yapılmıştır. Belirlenen tasarıma uygun olarak DMM ile üretilen numuneler Şekil 2.24b'de görülmektedir.



Şekil 2.24 : Darbe testi numuneleri (a) numune tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan darbe numuneleri.

Darbe testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında Şekil 2.25a'da görüldüğü üzere İzod darbe deneyi yapmaya uygun test cihazında 1 Jolue enerjili darbe çenesi ile gerçekleştirilmiştir. Test numunesi Şekil 2.25b'de görüldüğü üzere çenelere bağlanmıştır.



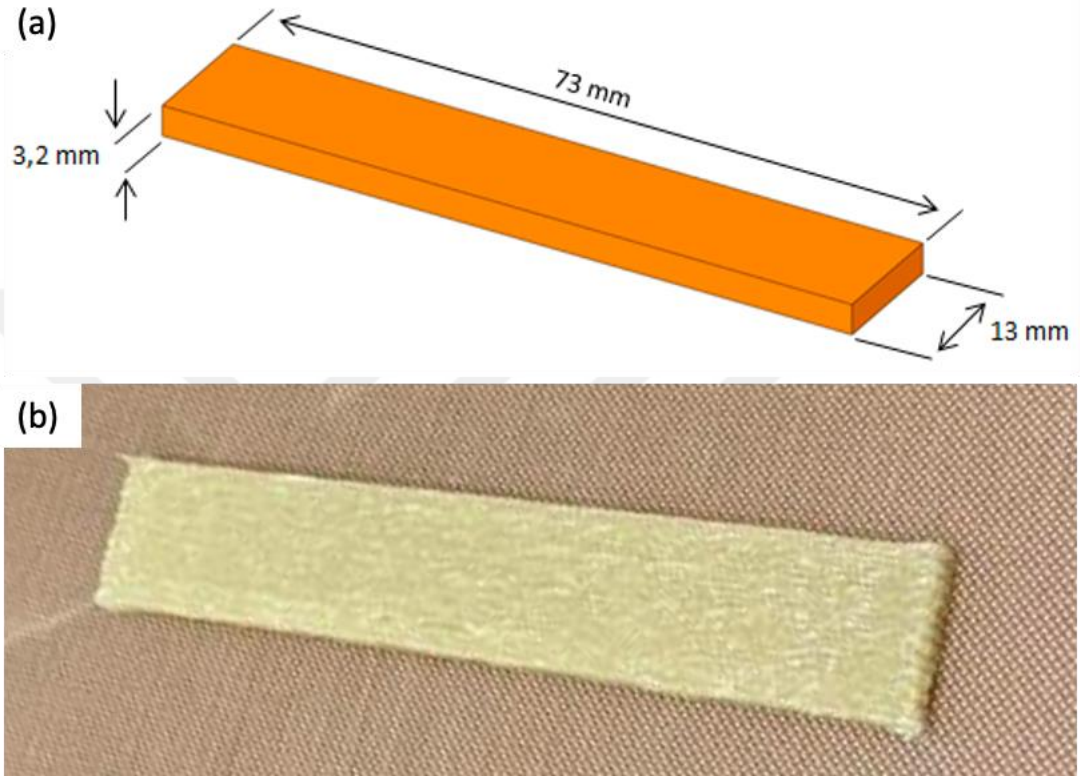
Şekil 2.25 :(a) Darbe test düzeneği, (b) test sonucunun görüldüğü cihaz ekranı ve (c) test numunesinin çeneler arasına yerleştirilmesi.

Test sonucunda her numunenin darbe sırasında sönmülediği enerji Şekil 2.25b'de görülen ekrandan okunarak kaydedilmiştir. Test sonuçlarının karşılaştırabilmesi ve numune ölçülerinin darbe dayanımı üzerindeki etkisinin arındırabilmesi için test sonucu elde edilen darbe enerjisi değerlerinin numune kesit alanlarına oranı hesaplanarak boyutsuz darbe dayanımları elde edilmiştir. Numunelerin darbe dayanımları ( $I_s$ ) Eşitlik (2.6)'da ifade edildiği şekilde elde edilen darbe sönmleme enerjisinin ( $E_i$ ), numunenin kesit alanına ( $A$ ) bölünmesiyle elde edilmiştir. İlgili standartta belirtildiği üzere her test grubundan en az 5 numune test edilmiştir ve numune gruplarının ortalama darbe dayanım değerleri ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır.

$$I_s = \frac{E_i}{A} \quad (2.6)$$

### 2.3.4 3-nokta eğme testi

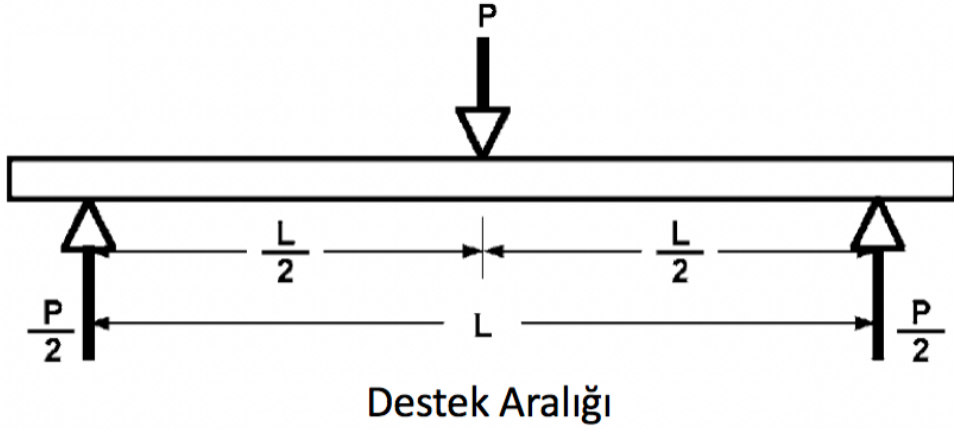
3-nokta eğme testleri için ASTM D7264 (Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials) standardına göre Şekil 2.26a'da görülen numune tasarımı yapılmış ve Şekil 2.26b'de görüldüğü gibi numune üretimi yapılmıştır.



Şekil 2.26 : 3-nokta eğme testi numuneleri (a) numune tasarımı (b) DMM ile üretilmekte olan numune

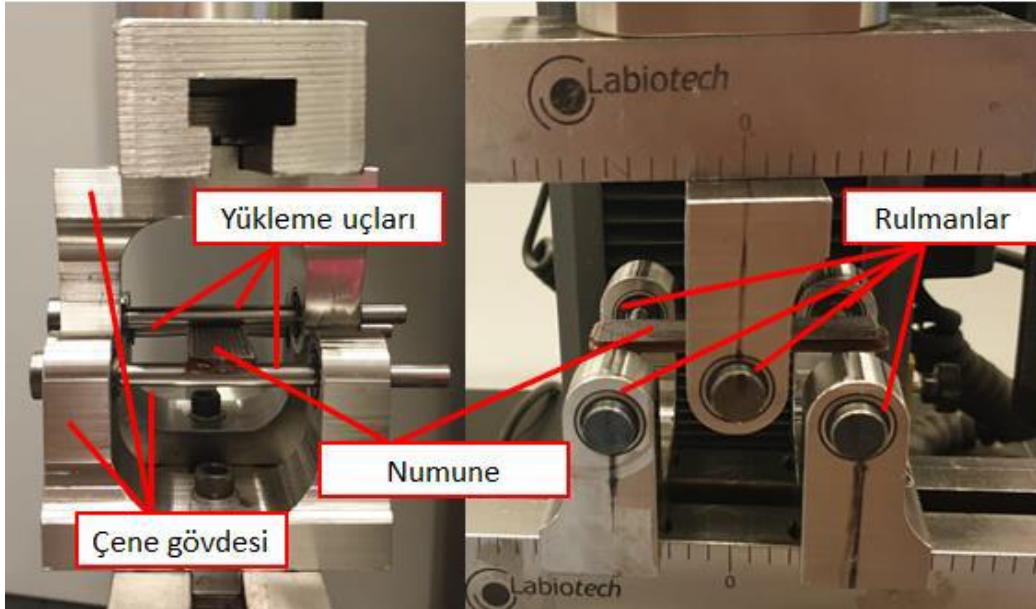
Şekil 2.27'te görüldüğü üzere 3-nokta eğme testinde numune iki desteğe dayanır ve destekler arasına ortadaki yükleme ucu ile yüklenir. Test numunesine uygulanan kuvvet, dış yüzeylerden birinde hasar gerçekleşinceye veya deformasyon önceden belirlenmiş bir değere ulaşana kadar ölçülür ve kaydedilir(American Society for Testing and Materials, 2007).





Şekil 2.27 :ASTM D7264 Standardına uygun 3-nokta eğme testi.

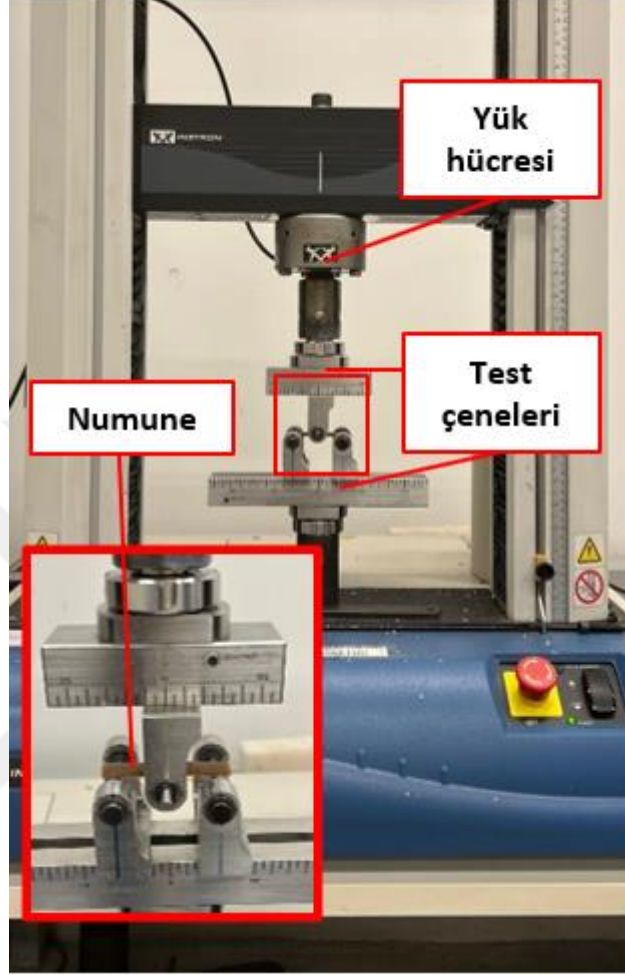
ASTM D7264 standardına göre Şekil 2.28'te görülen test aparatları tasarlanmıştır. Test aparatlarında çene gövdesi 2000 Serisi alüminyum bloktan TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi laboratuvarlarında işlenerek elde edilmiştir. Yükleme uçları, ısıl işlem görmüş sertleştirilmiş çelikten imal edilmiştir. Yükleme uçlarının, yükleme sırasında dönel hareket etmesini sağlayan rulmanlar test sırasında oluşabilecek aksel yüklerle dayanabilmesi için NKI 6/16 TV-XL serisinden seçilmiştir.



Şekil 2.28 :3-nokta eğme testleri için tasarlanan test aparatları.

Testler ASTM D7264 standardına göre Instron 3300 test basma-çekme cihazında uygulanmıştır. Numuneler boylamasına doğrultuda yazılmıştır. Yükleme hızı 1 mm/dakika olarak uygulanmıştır. Destek aralığı için 16:1 destek aralığı-kalınlık oranı

(span-to-thickness ratio) seçilmiştir. Belirlenen destek aralığında yük, numunenin orta noktasına uygulanmıştır (Şekil 2.27) ve her numune için yük-yer değiştirme verisi alınmıştır.



Şekil 2.29 : 3-nokta eğme testlerinin gerçekleştirildiği test cihazı.

Testler sonucunda elde edilen maksimum yük ( $P$ ) ve yer değiştirme ( $\delta$ ) değerleri ile numunelerin Eşitlik (2.7)'de ifade edildiği üzere eğilme gerinimi ( $\epsilon$ ) ve Eşitlik (2.8)'de ifade edildiği üzere eğilme gerilmesi ( $\sigma$ ) değerleri hesaplanmıştır.

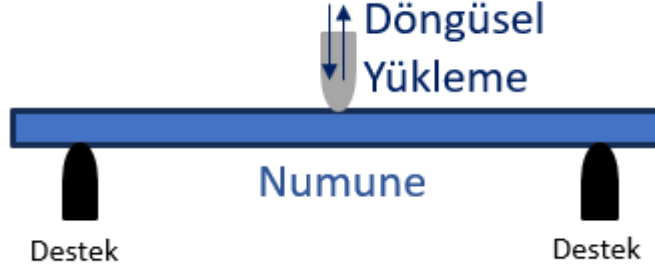
$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2.8)$$

Bu eşitliklerde  $h$  numune kalınlığını(mm),  $b$  numune genişliğini(mm),  $L$  destek aralığını(mm),  $P$  ise uygulanan maksimum kuvveti ifade etmektedir.

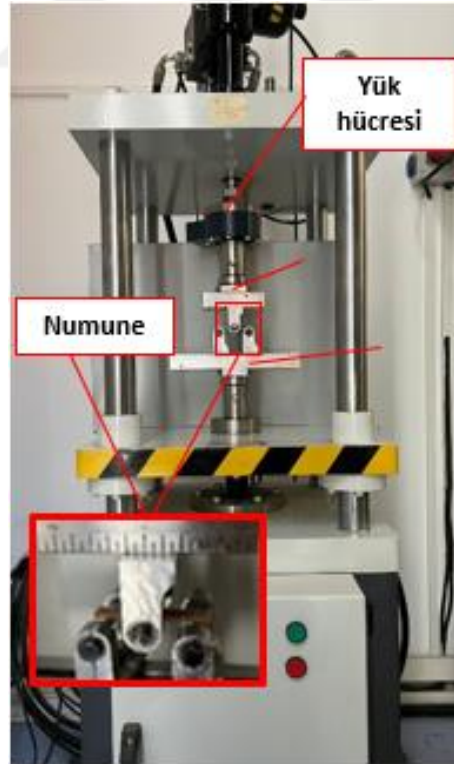
### 2.3.5 Yorulma testi

Yorulma testleri, ASTM D7264 standardında belirtilen 3-nokta eğme şeklinde döngüsel yük uygulama esasına göre Şekil 2.30'da şematik olarak gösterildiği üzere gerçekleştirilmiştir.



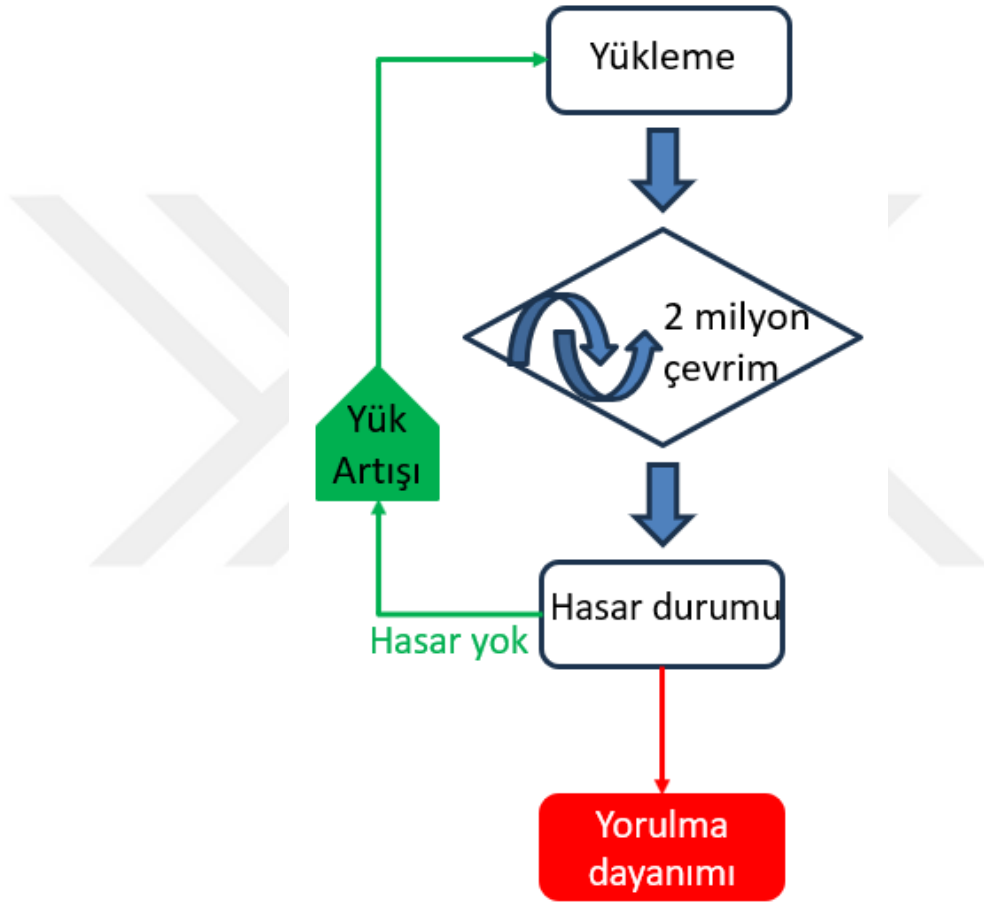
Şekil 2.30 : Döngüsel yüklemeye işleminin şematik gösterimi

Yorulma testleri, Şekil 2.31 'de görülen hidrolik yorulma cihazıyla (Labiotech, Ankara, Türkiye) 3-nokta eğme test aparatları kullanılarak döngüsel yüklemeye ile gerçekleştirilmiştir.

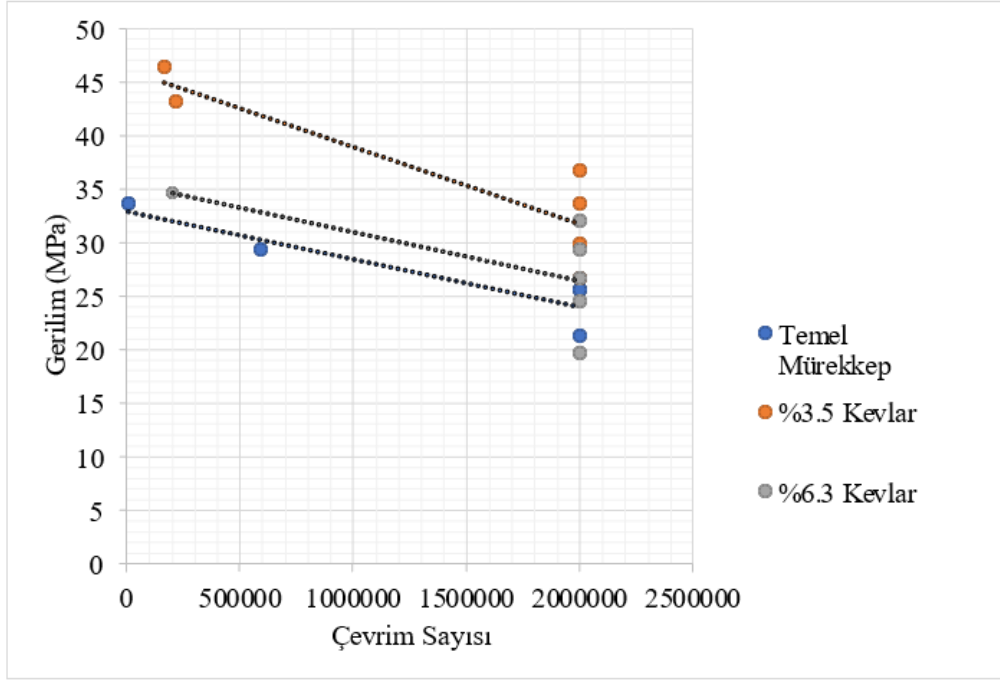


Şekil 2.31 : Yorulma test cihazı

Döngüsel yüklemeler, sinüzoidal olarak 0.1 yük oranı ile uygulanmıştır. Uygulanacak yük, akma dayanımına göre belirlenmiştir. Teste akma dayanımını %50'si ile başlanmıştır. Şekil 2.32'de de şematik olarak ifade edildiği üzere hasar meydana gelmesi durumunda yük azaltılarak teste yeniden başlanmıştır. 2 milyon çevrim sonrasında hasar oluşmaması durumunda ise yük artırılarak teste devam edilmiştir. Test sonuçları Şekil 2.33'de görüldüğü üzere Wöhler eğrisi (SN grafiği) şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 2.32 : Yorulma testi iş akış şeması



Şekil 2.33 : Yorulma testleri verileri ile oluşturulmuş SN grafiği

## 2.4 Mann Withney U Testi

Mann-Whitney U (MWU) testi, bağımsız iki grubun ortalamalarının karşılaştırılması için kullanılan parametrik olmayan bir testtir (Washington, 2010). İki bağımsız grup arasındaki sonuçları karşılaştırmak için popüler bir yöntem olan Mann Whitney U testi, gruplar arasında anlamlı fark olup olmadığını test etmek için kullanılır (Fallahpour, 2017). MWU testi düşük sayıda örneklem nedeniyle normal popülasyon dağılımları varsayımı karşılanmadığında iki popülasyon ortalamasının eşitliğini test etmek için kullanışlıdır. MWU testi için sıfır hipotezi, iki örnek dağılımı aynı popülasyondan alınmıştır şeklinde tanımlanır. Alternatif hipotez ise iki örnek dağılımı, iki farklı popülasyondan alınmıştır şeklinde tanımlanır. Test sonuçlarının MWU testi analizi SPSS 11.5 versiyonu ile yapılmıştır. MWU testi p değeri, değişkenlerin arasında anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için kullanılmış ve p değeri 0,05'ten küçük ise aralarında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu kabul edilmiştir.

## 2.5 Test Planı

Uygulanan çekme, darbe, üç-nokta eğme ve yorulma testleri için farklı içerik ve özellikte hazırlanan mürekkep içerikleri ve üretilen numune sayıları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Belirtilen numune gruplarının test sonuçları incelenerek;

- Hız oranının,
- Kil ve fiber eklenti oranlarının,
- Farklı fiber türlerinin,
- Farklı fiber uzunluklarının
- Farklı fiberlerin beraber kullanımının mekanik özelliklere etkisi deneysel olarak incelenmiştir.



Çizelge 2.7 : Farklı içerik ve özellikte hazırlanan numune gruplarının mürekkep içerikleri ve üretilen numune sayıları.

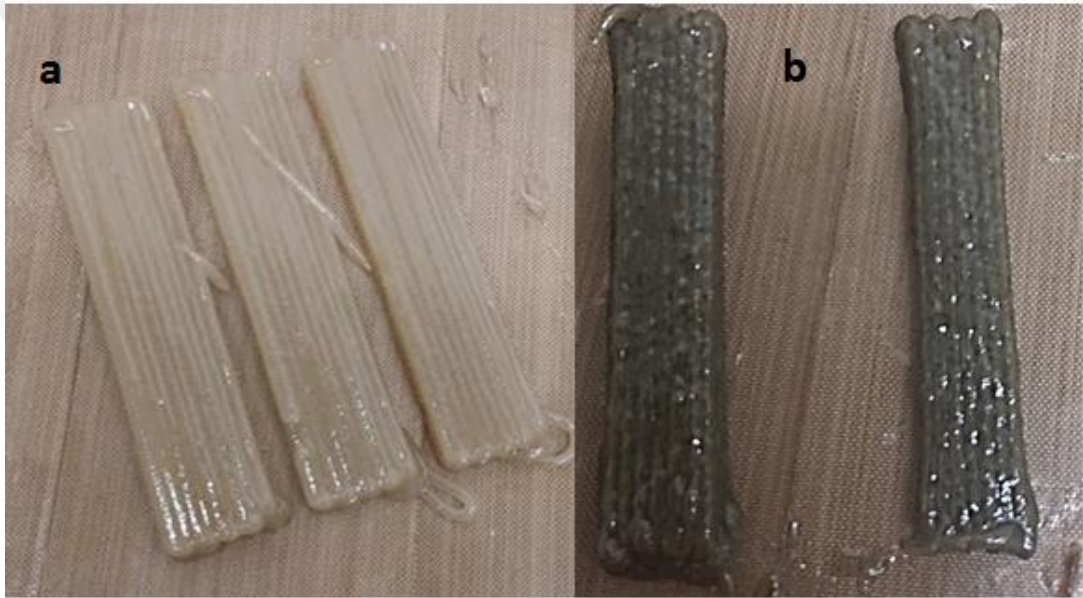
Numune grup adı	Numune mürekkep eklenti içeriği	HO	3-nokta Eğme ve Yorulma Numunesi Sayısı	Darbe Numunesi Sayısı	Çekme Numunesi Sayısı
%5 Temel Mürekkep HO1,5	%5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%8 Temel Mürekkep HO1,5	%8 Nano-kil	1.5	10	5	5
%3,5 Kevlar HO1,5	%3,5 600µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%6,3 Kevlar HO1,5	%6,3 600µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%3,5 KF HO1,5	%3,5 KF, %5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%6,3 KF HO1,5	%6,3 KF, %5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%3,15 Kevlar %3,15 KF HO1,5	%3,15 Kevlar %3,15 KF, %5 Nano-kil	1.5	10	5	5
%5 Temel Mürekkep HO1	%5 Nano-kil	1	10	5	5
%3,5 Kevlar HO1	%3,5 600µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1	10	5	5
%6,3 Kevlar HO1	%6,3 600µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1	10	5	5
%7 Kevlar HO1	%7 600µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1	10	5	5
%3,5 Kevlar 800µm HO1	%3,5 800µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1	10	5	5
%3,5 Kevlar 1000µm HO1	%3,5 1000µm Kevlar Fiber, %5 Nano-kil	1	10	5	5
Saf Epoksi	-	-	10	5	5
KF %20 NK%3 HO1,5	%20 KF %3 Nano-kil	1.5	10	-	-

### 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

#### 3.1 Test Sonuçları

##### 3.1.1 İlk çalışma kapsamında gerçekleştirilen statik ve dinamik testler

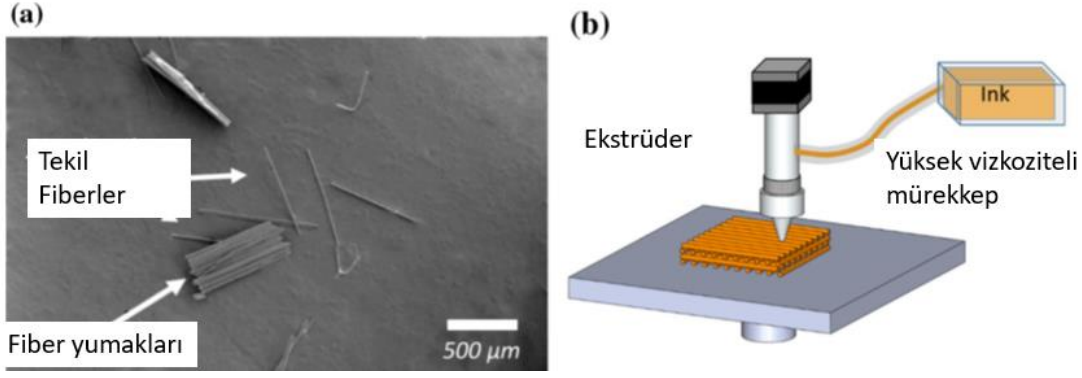
Tez kapsamında yapılan ilk çalışmada University of Miami'de üretilip gönderilen temel mürekkep, %3,5 Kevlar ve %6,3 Kevlar içeren numunelerin (Şekil 3.1) statik ve dinamik mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için 3-nokta eğme ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : Test için gönderilen numuneler (a) temel mürekkep ve (b) %6,3 Kevlar fiber içeren numuneler

Şekil 3.1'de görülen numuneler lazer kesim ile elde edilen Kevlar fiberler kullanılarak elde edilmiştir. Lazer kesim ile elde edilen fiberlerde, Şekil 3.2a'da görülen fiber demetleri ile karşılaşmıştır. Bu istenmeyen fiber demetleri sebebiyle hazırlanan mürekkebin nozuldan ekstrüzyonu daha zor olduğu için, hava basıncı ile çalışan şırınga sistemi yerine Şekil 3.2b'de şematik olarak gösterilen ekstrüzyon sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde 2 mm çapında nozul kullanılmıştır.



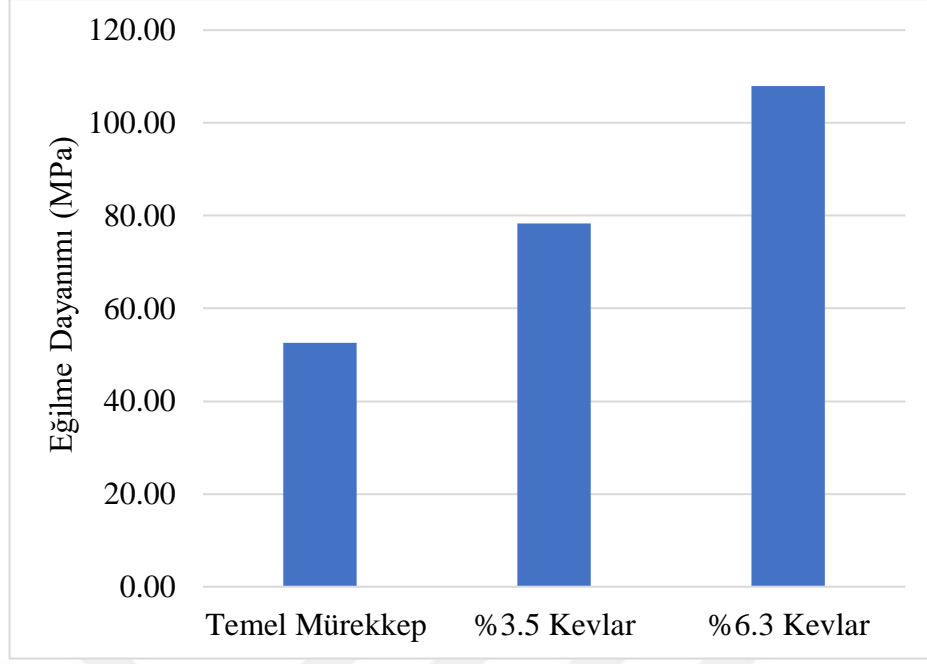


Şekil 3.2 : (a) İlk çalışmada kullanılan fiberlerin görüntüsü ve (b) kullanılan mürekkep ekstrüzyon sisteminin şematik görüntüsü

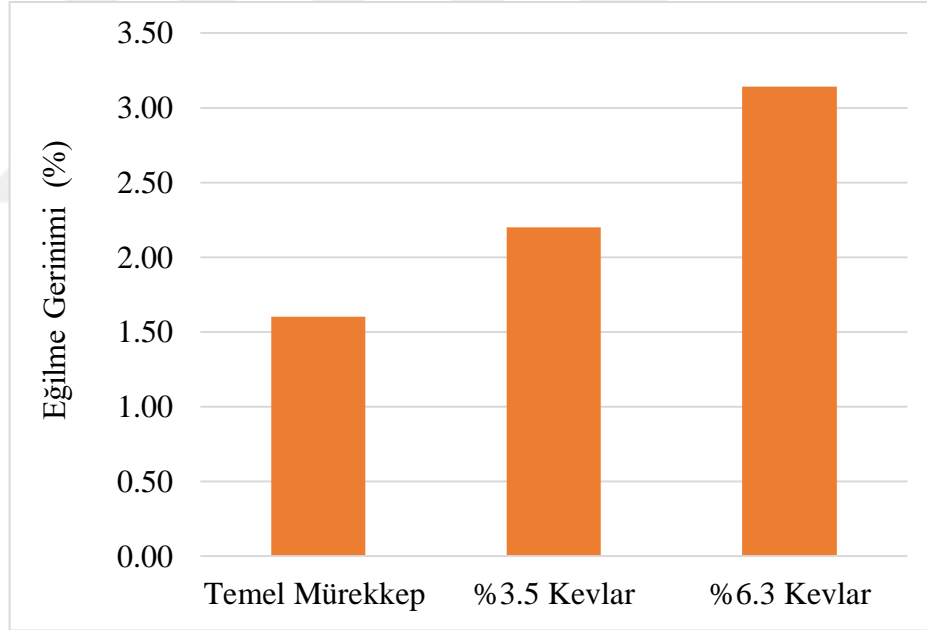
Gönderilen test numuneleri üzerinde hasar (kırılma oluşana kadar) 3-nokta eğme testi uygulanmıştır. Testler önceki bölümlerde belirtildiği üzere ASTM D7264 standardına göre Instron 3300 test basma-çekme cihazında uygulanmıştır. Yükleme hızı 1 mm/dakika olarak uygulanmıştır. Destek aralığı için 16:1 destek aralığı-kalınlık oranı (span-to-thickness ratio) seçilmiştir. 60 mm olarak belirlenen destek aralığında yük numunenin orta noktasında uygulanmıştır. Yapılan 3-nokta eğme testlerini sonucunda numune gruplarının ortalama eğilme dayanımı ve hasar anında eğilme gerinimi değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Test gruplarının eğilme dayanımları Şekil 3.3’te, eğilme gerinimleri ise Şekil 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Numune gruplarının ortalama eğilme dayanımı ve hasar anında eğilme gerinimi değerleri

Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)	Hasar Gerinmesi (%)
Saf Epoksi	52,63	1,6
%3,5 Kevlar	78,3	2,2
%6,3 Kevlar	108	3,14



Şekil 3.3 : Numunelerin 3-nokta eğme dayanımları.



Şekil 3.4 : Numunelerin hasar anında eğilme gerinimleri.

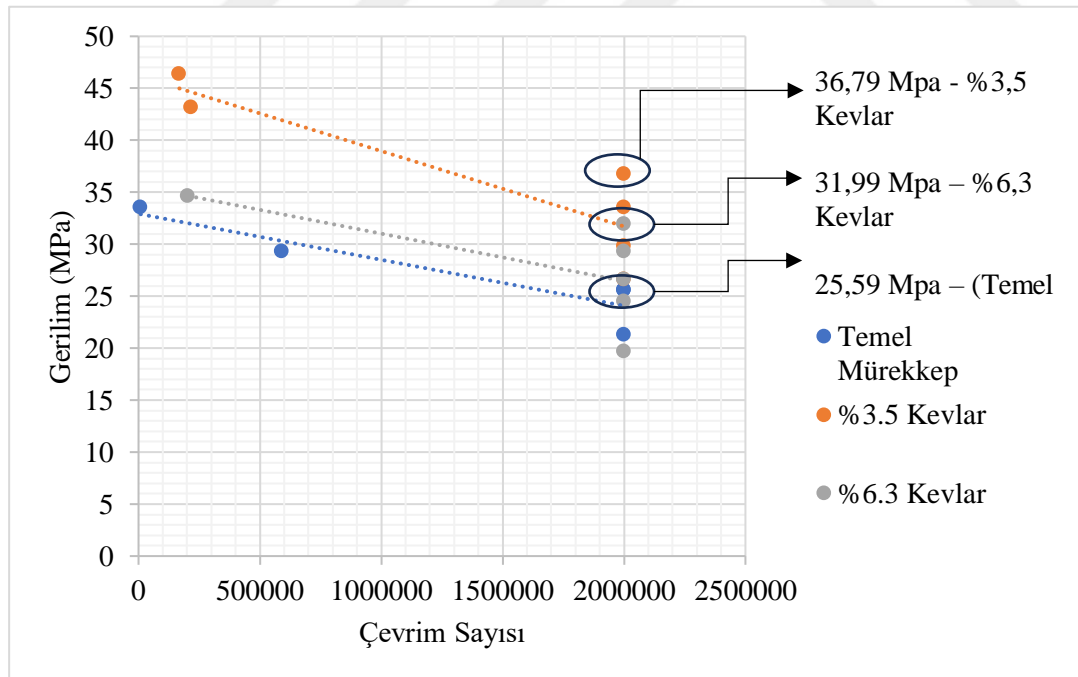
Gönderilen numunelere üzerinde gerçekleştirilen dinamik testler, yorulma test cihazıyla (Labiotech, Ankara, Türkiye) döngüsel yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Döngüsel yüklemeler, sinüzoidal olarak 0.1 yük oranı ile uygulanmıştır. Uygulanacak yük, akma dayanımına göre belirlenmiştir. Teste akma dayanımının %50'si ile başlanmıştır. Hasar meydana gelmesi durumunda yük azaltılarak teste yeniden başlanmıştır. 2 milyon çevrim sonrasında hasar oluşmaması durumunda ise yük

artırılarak teste devam edilmiştir. Dinamik testlere ait veriler Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Test verilerinden elde edilen SN grafiği Şekil 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Dinamik test verileri

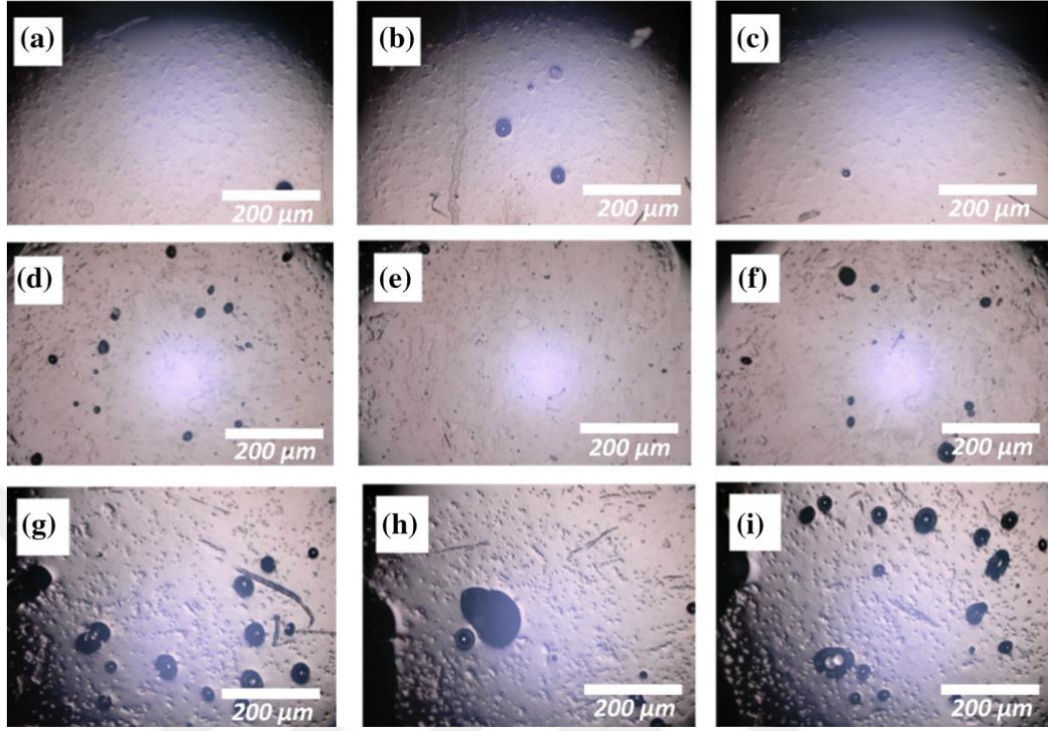
#	Saf Epoksi		% 3.5 Kevlar		%6,3 Kevlar	
	Yük (N)	Çevrim	Yük (N)	Çevrim	Yük (N)	Çevrim
1	40	2000000	50	2000000	28	2000000
2	63	8717	87	168069	65	203412
3	48	2000000	56	2000000	37	2000000
4	48	2000000 (6705565)	63	2000000	46	2000000
5			69	2000000 (3240048)	55	20000000
6	55	590000	81	217614	60	10000000



Şekil 3.5 : Numune gruplarına ait SN grafikleri.

Test numunelerinin yüzeyleri optik mikroskop altında incelenmiş ve görüntüler Şekil 3.6’da verilmiştir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde, kırık yüzeyinde en düşük

gözenekliliğe %1,39 ile temel mürekkep numunesinin sahip olduğu, onu %2,05 ile %3,5 Kevlar ve %12,04 ile %6,3 Kevlar içeren numunenin takip ettiği görülmüştür.



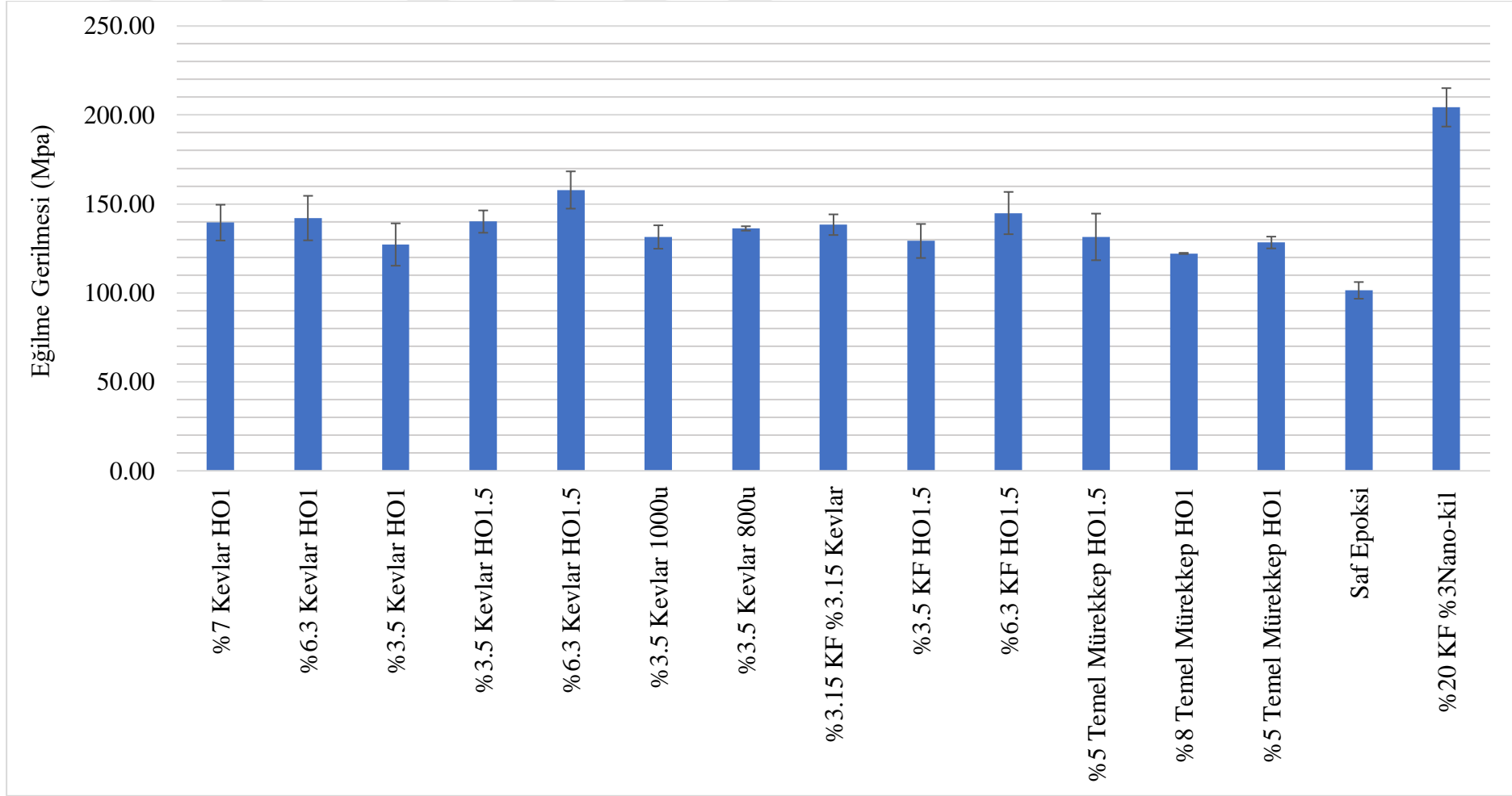
Şekil 3.6 : Test numunelerinin dinamik kırık yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri. a-c temel mürekkep numunesi, d-f %3,5 Kevlar ve g-i %6,3 Kevlar fiber içeren kompozit numune.

### 3.1.2 Çekme testi sonuçları

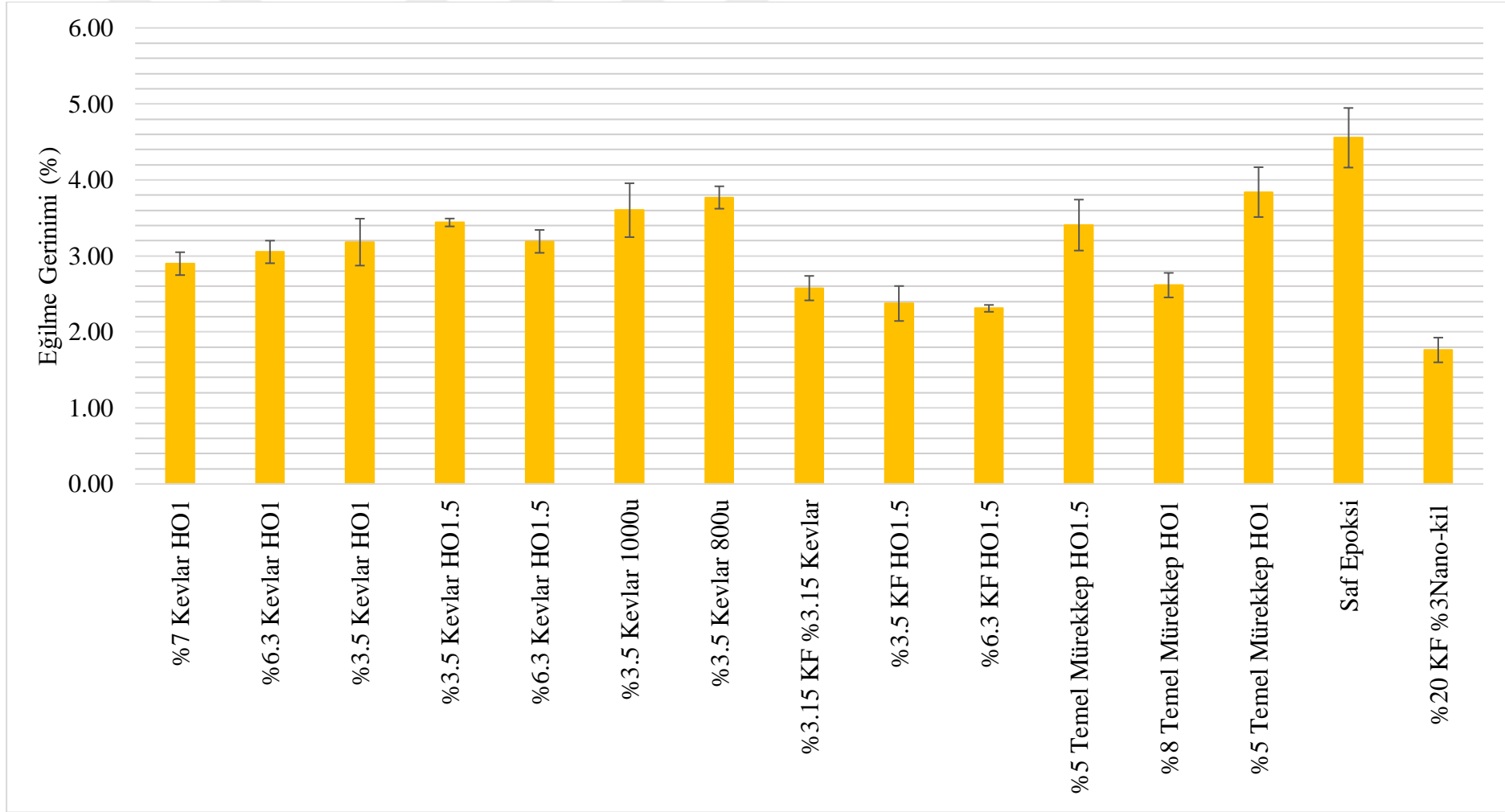
Tüm numune gruplarının çekme testi sonucunda elde edilen ortalama gerilme ve gerim değerlerine ait veriler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Tüm numune gruplarının ortalama gerilme değerlerini gösteren grafik Şekil 3.7'de ve hasar anında gerinim değerlerini gösteren grafik ise Şekil 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Tüm numune gruplarının çekme testi sonuçları.

Test Grubu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Hasar Gerinmesi (%)
<b>%7 Kevlar HO1</b>	139,49 ± 10,06	2,9 ± 0,15
<b>%6,3 Kevlar HO1</b>	142,05 ± 12,51	3,05 ± 0,15
<b>%3,5 Kevlar HO1</b>	127,17 ± 11,9	3,18 ± 0,31
<b>%3,5 Kevlar HO1,5</b>	140,07 ± 6,27	3,44 ± 0,05
<b>%6,3 Kevlar HO1,5</b>	157,84 ± 10,47	3,19 ± 0,15
<b>%3,5 Kevlar 1000µm</b>	131,41 ± 6,58	3,6 ± 0,35
<b>%3,5 Kevlar 800µm</b>	136,23 ± 1,22	3,77 ± 0,15
<b>%3,15 KF %3,15 Kevlar</b>	138,33 ± 5,8	2,58 ± 0,16
<b>%3,5 KF HO1,5</b>	129,18 ± 9,56	2,37 ± 0,23
<b>%6,3 KF HO1,5</b>	144,87 ± 11,88	2,31 ± 0,05
<b>%5 Temel Mürekkep HO1,5</b>	131,46 ± 13,11	3,41 ± 0,34
<b>%8 Temel Mürekkep HO1</b>	122,18 ± 0,33	2,62 ± 0,16
<b>%5 Temel Mürekkep HO1</b>	128,31 ± 3,31	3,84 ± 0,33
<b>Saf Epoksi</b>	101,41 ± 4,68	4,55 ± 0,39
<b>%20 KF %3Nano-kil</b>	204,28 ± 10,79	1,76 ± 0,16



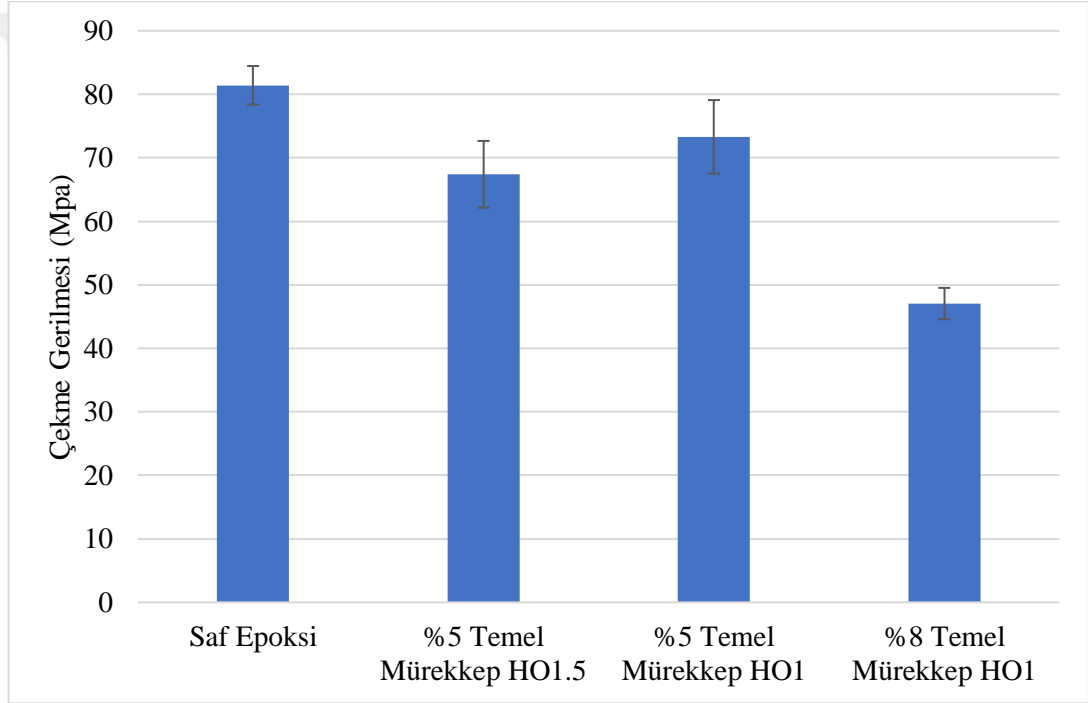
Şekil 3.7 : Tüm test gruplarının ortalama çekme dayanımları.



Şekil 3.8 : Tüm test gruplarının ortalama çekme gerinimleri.

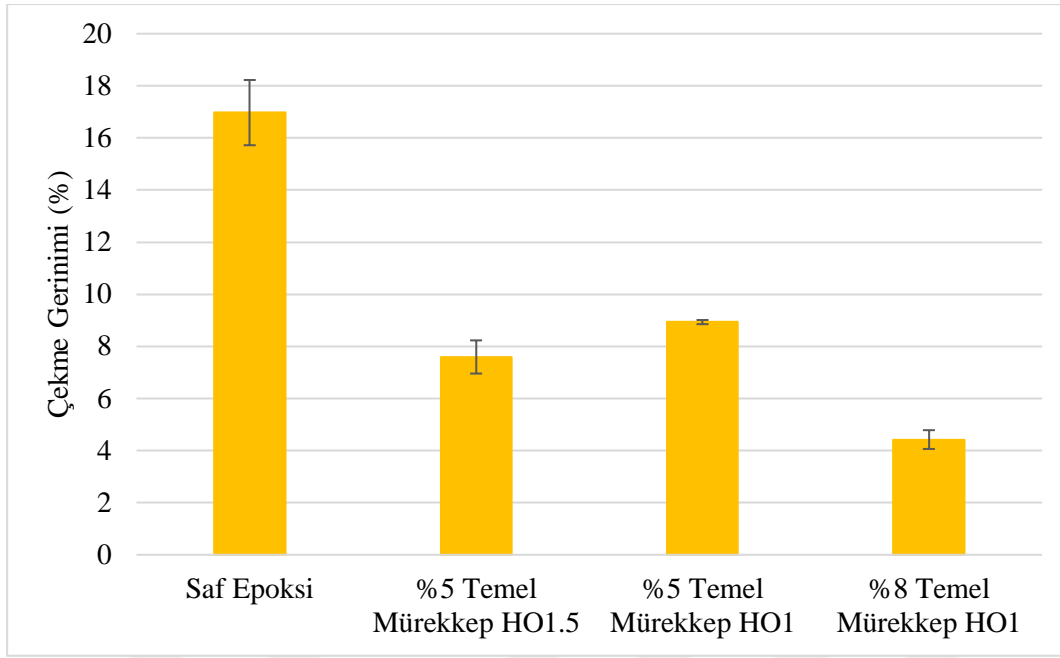
### 3.1.2.1 HO ve nano-kil oranının çekme dayanımına etkisi

HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı HO ve nano-kil oranına sahip numunelerin çekme dayanımları Şekil 3.9'da, çekme gerinimleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.4'de verilmiştir. Nano-kil eklentisinin numunelerin çekme gerinimi değerlerine negatif yönde etki yaptığı ve daha gevrek karakter gösteren numunelerin nano-kil oranı arttıkça daha düşük çekme gerilmelerine dayanabildiği gözlemlenmiştir. HO'nun çekme gerilmesi üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir ( $p=0,149$ ).



Şekil 3.9 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme dayanımları grafiği.





Şekil 3.10 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.

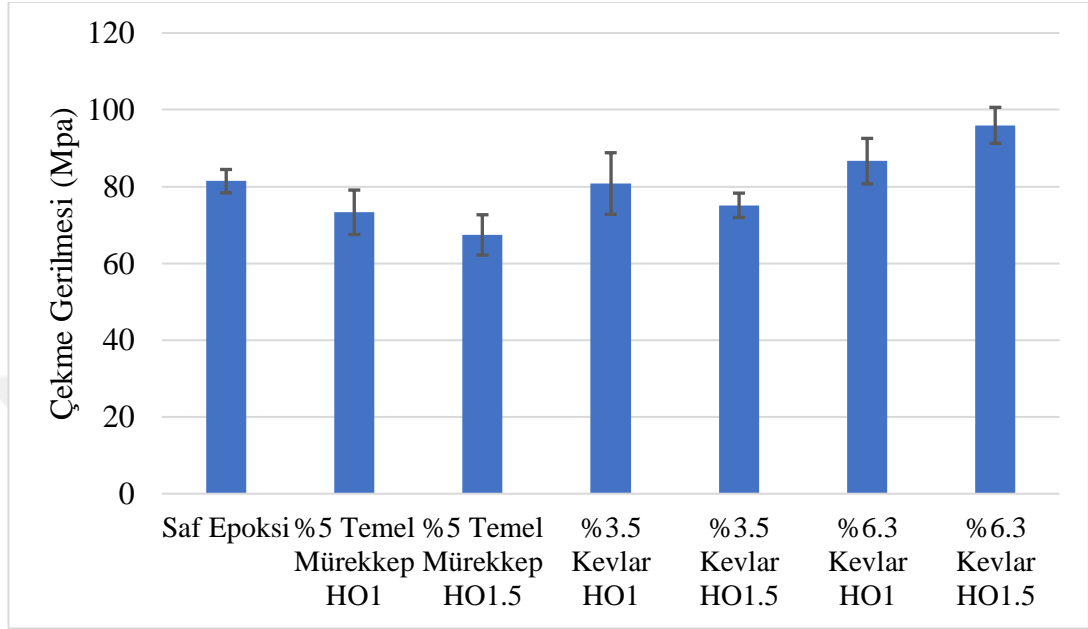
Çizelge 3.4 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test Grupları	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%5 Temel Mürekkep HO1,5	0,149	0,011
%8 Temel Mürekkep HO1	0,008	0,003
%5 Temel Mürekkep HO1		0,019

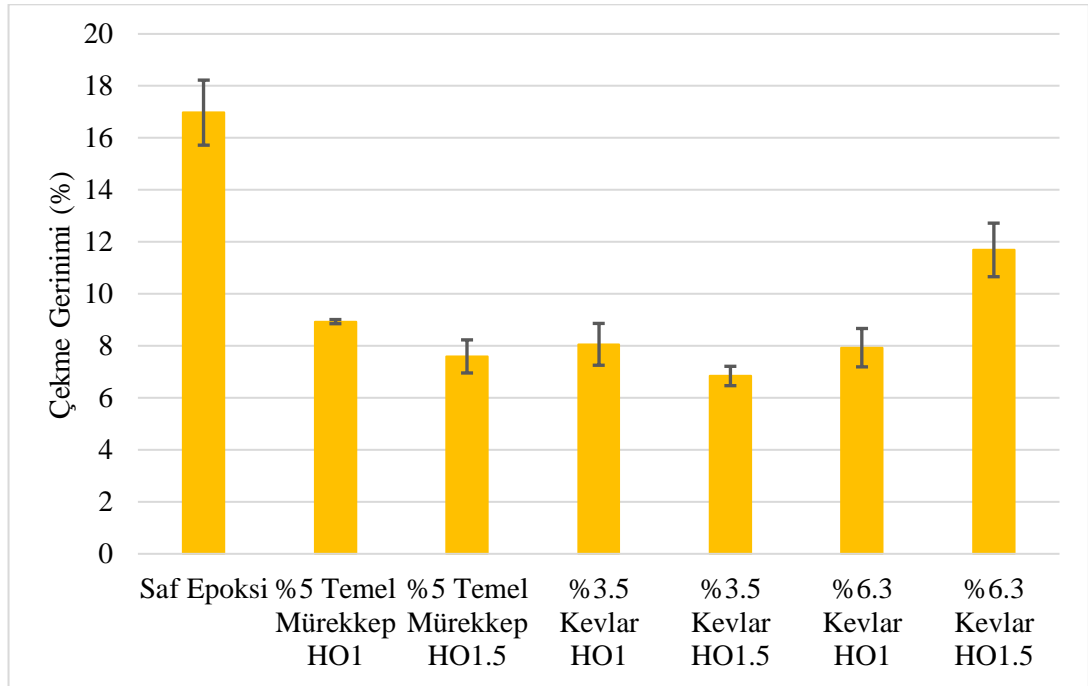
### 3.1.2.2 HO ve Kevlar oranının çekme dayanımına etkisi

HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için farklı HO ve Kevlar oranına sahip numunelerin çekme dayanımları Şekil 3.11’de, çekme gerinimleri ise Şekil 3.12’de verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.5’te görülmektedir. Nano-kil eklentisinin çekme dayanımına negatif etkisi olsa da Kevlar fiber eklentilerin numunelerin çekme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca HO %6,3 Kevlar

fiber eklentisinin numunelerde çekme dayanımını saf epoksi, temel mürekkep ve %3,5 Kevlar eklentili numunelere göre pozitif yönde istatistiksel olarak anlamlı şekilde değiştirdiği gözlemlenmiştir ( $p(\text{saf epoksi})=0,006$ ,  $p(\text{temel mürekkep})=0,014$ ,  $p(\%3,5 \text{ Kevlar})=0,014$ ).



Şekil 3.11 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme dayanımı grafiği.



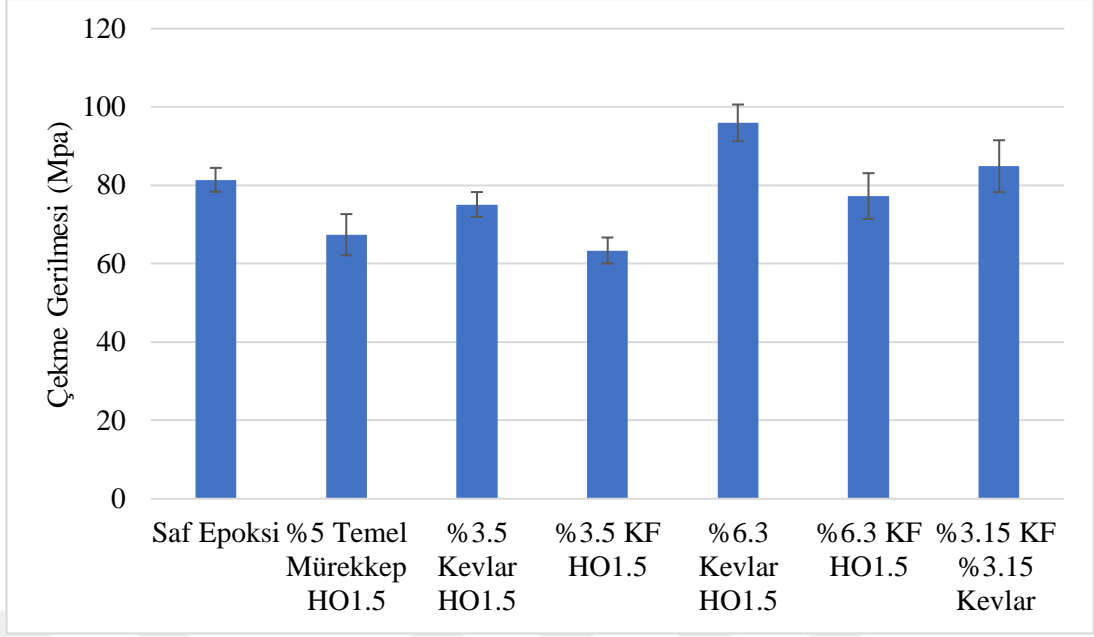
Şekil 3.12 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.

Çizelge 3.5 : HO ve Kevlar oranının Etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri

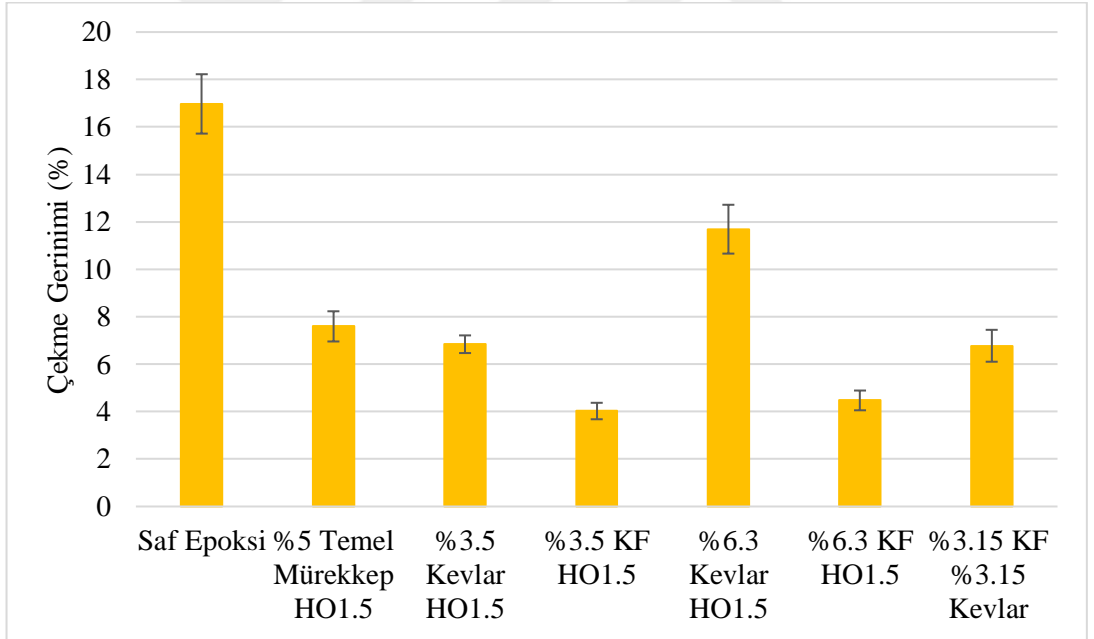
Test Grupları	%3,5 Kevlar HO1	%3,5 Kevlar HO1,5	%6,3 Kevlar HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%6,3 Kevlar HO1	0,361		0,047		0,221	0,201
%3,5 Kevlar HO1		0,286			0,522	0,873
%3,5 Kevlar HO1,5			0,014	0,149		0,019
%6,3 Kevlar HO1,5				0,014		0,006
%5 Temel Mürekkep HO1,5					0,149	0,011
%5 Temel Mürekkep HO1						0,019

### 3.1.2.3 Farklı fiber türlerinin çekme dayanımına etkisi

Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için KF ve Kevlar eklentili numunelerin çekme dayanımları Şekil 3.13'te, çekme gerinimleri ise Şekil 3.14'te verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.6'da görülmektedir. Kevlar eklentili numunelerin her iki eklenti oranında da (%3,5 ve %6,3) KF eklentili numunelere göre çekme dayanımının istatistiksel olarak anlamlı şekilde yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Kevlar eklentili numunelerin KF eklentili numunelere göre daha yüksek gerinim değerlerine sahip olduğu böylece daha esnek yapıda oldukları görülmüştür.



Şekil 3.13 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların çekme dayanımı grafiği.



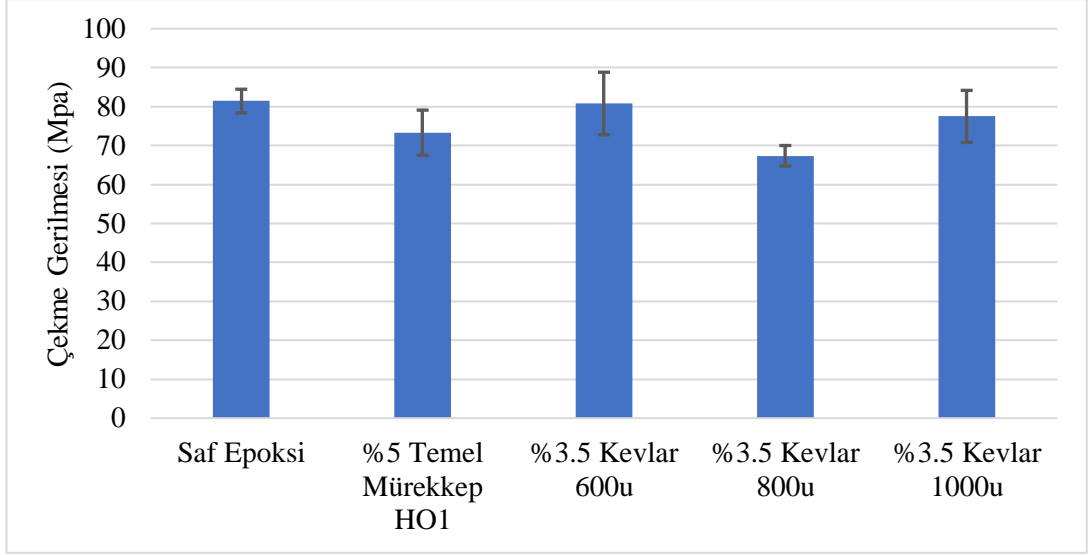
Şekil 3.14 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.

Çizelge 3.6 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

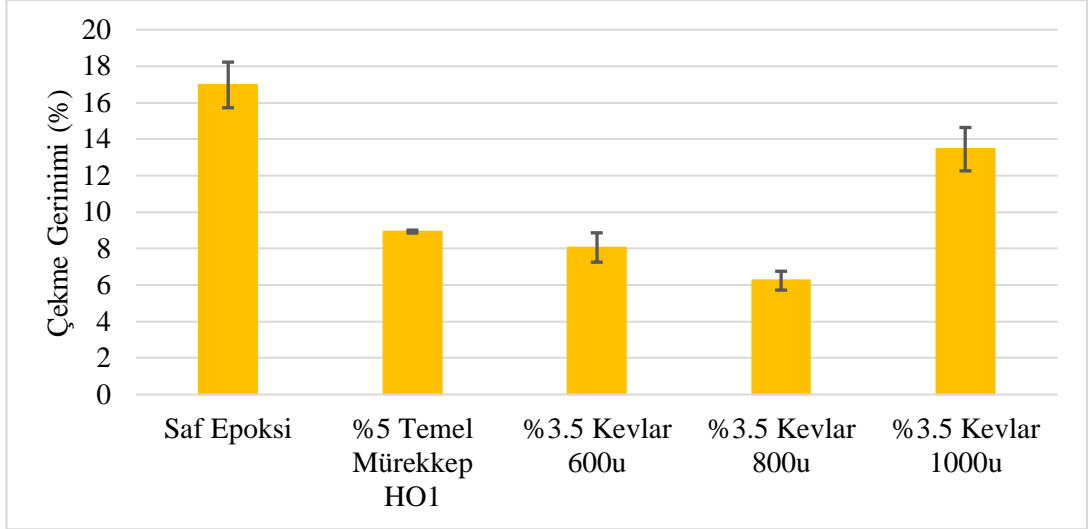
Test Grupları	%6,3 Kevlar HO1,5	%3,5 KF HO1,5	%6,3 KF HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1,5	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar HO1,5	0,014	0,014		0,149	0,019
%6,3 Kevlar HO1,5			0,004	0,014	0,006
%3,15 KF %3,15 Kevlar HO1,5	0,016			0,014	0,028
%3,5 KF HO1,5				0,327	0,006
%6,3 KF HO1,5				0,038	0,475
%5 Temel Mürekkep HO1,5					0,011

#### 3.1.2.4 Fiber uzunluğunun çekme dayanımına etkisi

Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı boylarda Kevlar eklentili numunelerin çekme dayanımları Şekil 3.15'te, çekme gerinimleri ise Şekil 3.16'da verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.7'de görülmektedir. 600 $\mu$ m fiber uzunluğuna sahip test grubu, 800 $\mu$ m fiber içeren gruba göre anlamlı derecede yüksek ( $p=0,045$ ) çekme dayanımı göstermiştir. 600 $\mu$ m fiber içeren grup 1000 $\mu$ m fiber içeren gruba göre de daha yüksek ortalama çekme dayanımı değerine sahip olsa da iki grup arasında anlamlı fark görülmemiştir ( $p=0,715$ ). 1000 $\mu$ m fiber içeren grup 600 $\mu$ m ve 800 $\mu$ m uzunluğunda fiber içeren gruplara göre daha yüksek ortalama hasar gerinimi değerine sahiptir.



Şekil 3.15 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme test sonuçları.



Şekil 3.16 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların çekme gerinim grafiği.

Çizelge 3.7 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının çekme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test Grupları	%3,5 Kevlar 800µm HO1	%3,5 Kevlar 1000µm HO1	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar 600µm HO1	0,045	0,715	0,522	0,873
%3,5 Kevlar 800µm HO1		0,076	0,142	0,006
%3,5 Kevlar 1000µm HO1			1,000	0,273
%5 Temel Mürekkep HO1				0,019

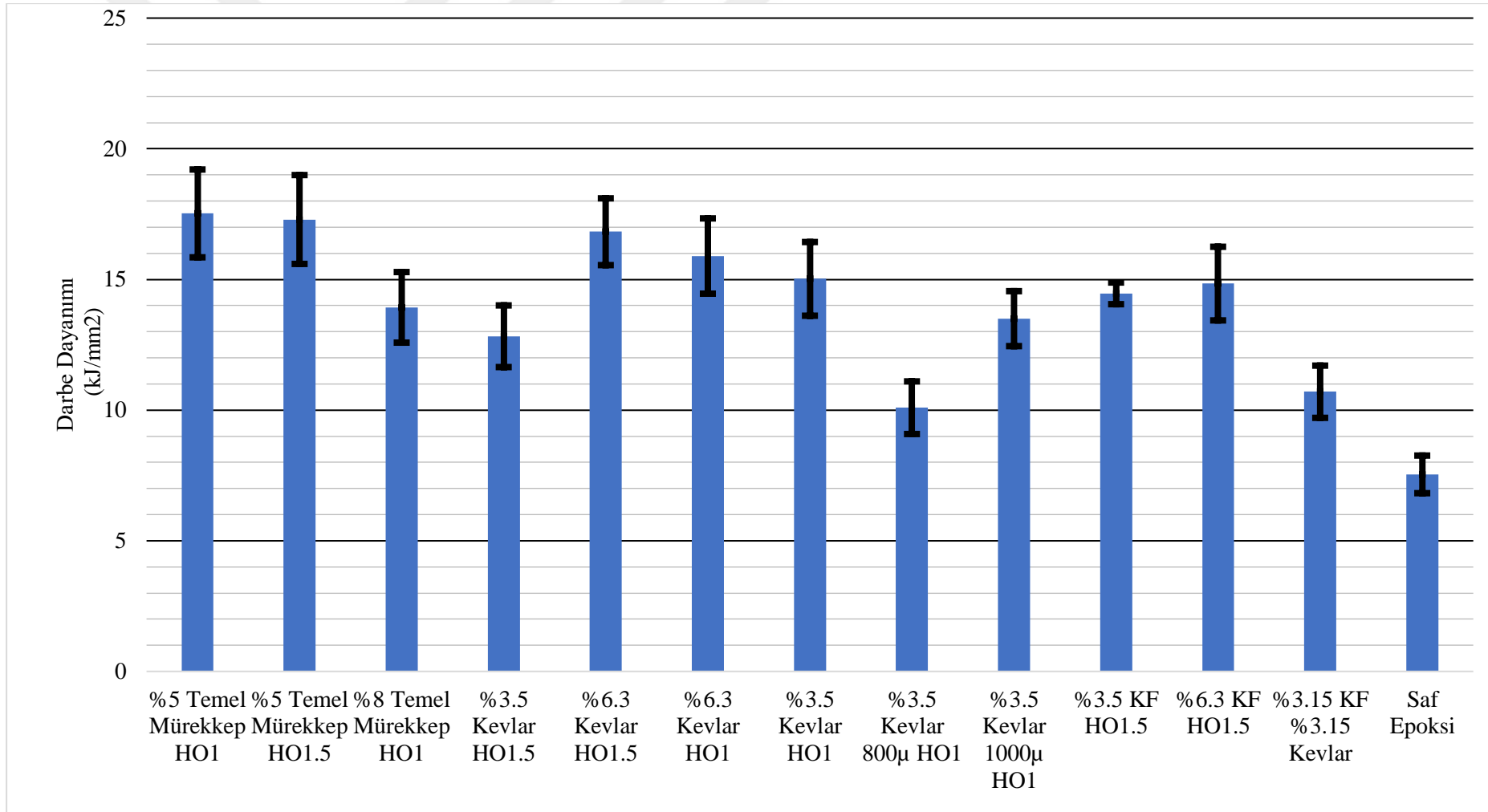
### 3.1.3 Darbe testi sonuçları

Tüm numune gruplarının ortalama darbe dayanım değerleri Çizelge 3.8’de verilmiş, sonuçlar Şekil 3.17’de grafik olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 3.8 : Tüm numune gruplarının ortalama darbe dayanım değerleri.

<b>Test Grubu</b>	<b>Darbe Dayanımı (kJ/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>%5 Temel Mürekkep HO1</b>	17,53 ± 1,68
<b>%5 Temel Mürekkep HO1,5</b>	17,29 ± 1,7
<b>%8 Temel Mürekkep HO1</b>	13,93 ± 1,35
<b>%3,5 Kevlar HO1,5</b>	12,83 ± 1,18
<b>%6,3 Kevlar HO1,5</b>	16,83 ± 1,28
<b>%6,3 Kevlar HO1</b>	15,89 ± 1,44
<b>%3,5 Kevlar HO1</b>	15,02 ± 1,41
<b>%3,5 Kevlar 800µm HO1</b>	10,09 ± 1,01
<b>%3,5 Kevlar 1000µm HO1</b>	13,5 ± 1,05
<b>%3,5 KF HO1,5</b>	14,47 ± 0,42
<b>%6,3 KF HO1,5</b>	14,84 ± 1,41
<b>%3,15 KF %3,15 Kevlar</b>	10,7 ± 1
<b>Saf Epoksi</b>	7,54 ± 0,72

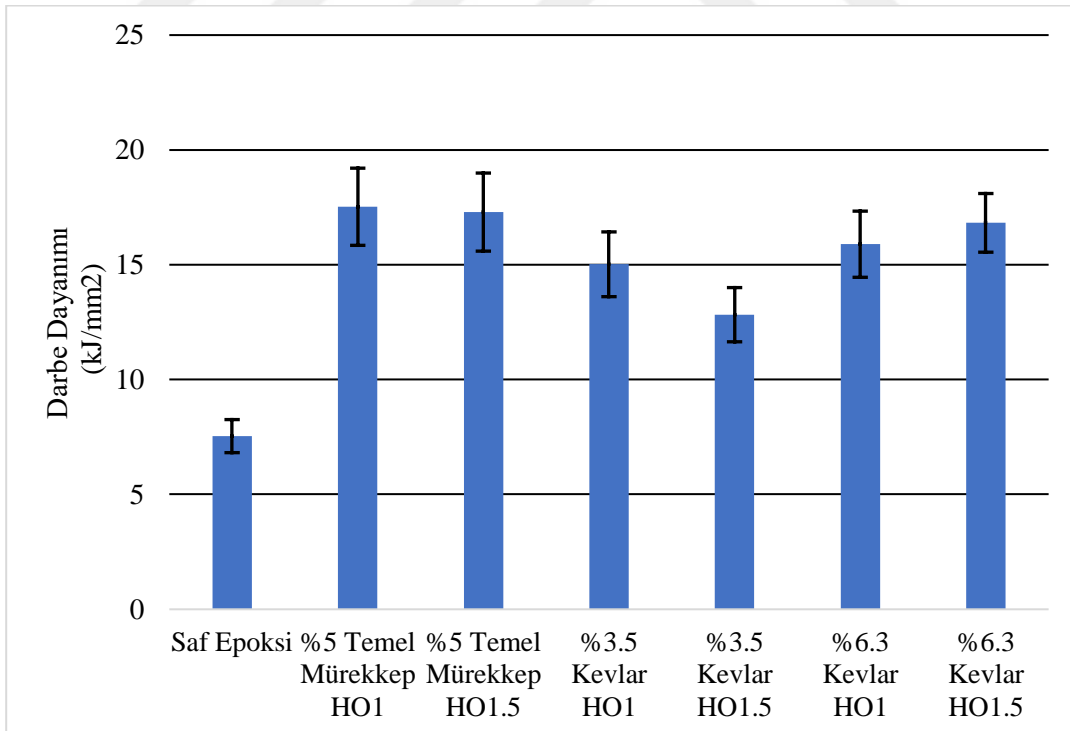




Şekil 3.17 : Tüm test gruplarının darbe testi sonuçları.

### 3.1.3.1 HO nano-kil oranı ve Kevlar oranının darbe dayanımına etkisi

HO, nano-kil oranı ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı HO ve nano-kil oranına sahip numunelerin darbe testi sonuçları Şekil 3.18'de; test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.9'da verilmiştir. HO'nun numunelerin sönümlendiği darbe enerjisi miktarına istatistiksel olarak anlamlı şekilde etki etmediği gözlemlenmiştir. Nano-kil oranının sönümlenen darbe enerjisi miktarına pozitif yönde anlamlı düzeyde etki ettiği görülmüştür. Fiber eklentili numunelerin, içinde fiber bulunmayan temel mürekkep numunelerine göre daha düşük darbe dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Mürekkep hazırlama aşamasında, fiber eklentisinin sebep olduğu istenmeyen gözeneklerin fiber eklentili numunelerin darbe dayanım değerlerinin düşmesine sebep olduğu şeklinde değerlendirilmiştir. %3,5 oranında Kevlar eklenmesinin, sönümlenen darbe enerjisini temel mürekkep numunelerine göre düşürdüğü görülmüştür. %6,5 oranında Kevlar eklenmesinin ise darbe enerjisi sönümleme özelliğini yeniden temel mürekkep numunelerinin seviyesine çıkardığı görülmüştür.



Şekil 3.18 : HO, nano-kil oranı ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe dayanımları grafiği

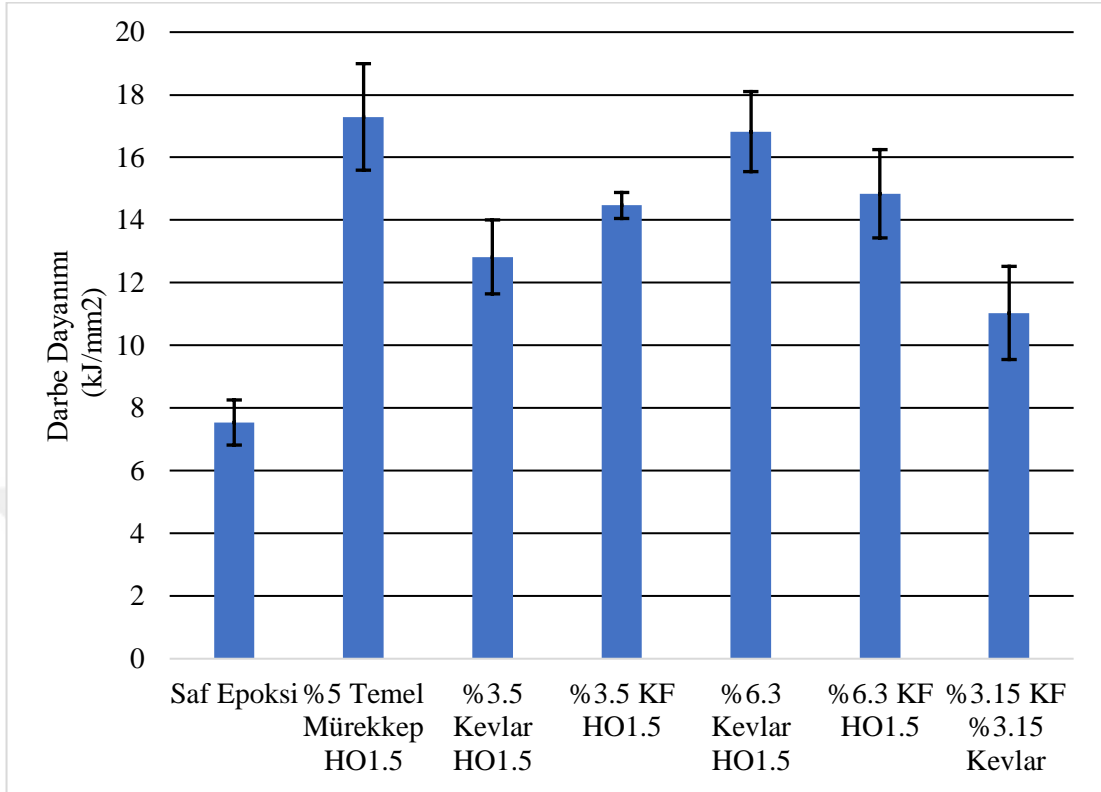
Çizelge 3.9 : HO, nano-kil oranı ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test grupları	%3,5 Kevlar HO1	%3,5 Kevlar HO1,5	%6,3 Kevlar HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%6,3 Kevlar HO1	0,394		0,465		0,201	0,004
%3,5 Kevlar HO1		0,201			0,142	0,011
%3,5 Kevlar HO1,5			0,006	0,006		0,016
%6,3 Kevlar HO1,5				0,806		0,006
%5 Temel Mürekkep HO1,5					1,000	0,011
%5 Temel Mürekkep HO1						0,006

### 3.1.3.2 Farklı fiber türlerinin darbe dayanımına etkisi

Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karbon fiber ve Kevlar eklentili numunelerin darbe testi sonuçları Şekil 3.19’da verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.10’da görülmektedir. %3,5 KF ve %6,3 KF test grupları arasında anlamlı darbe dayanımı farkı görülmemiştir. %6,3 Kevlar grubu %6. KH grubundan daha

yüksek ortalama darbe dayanımına sahip olmasına rağmen aralarında anlamlı fark bulunmamaktadır ( $p=0,088$ ).



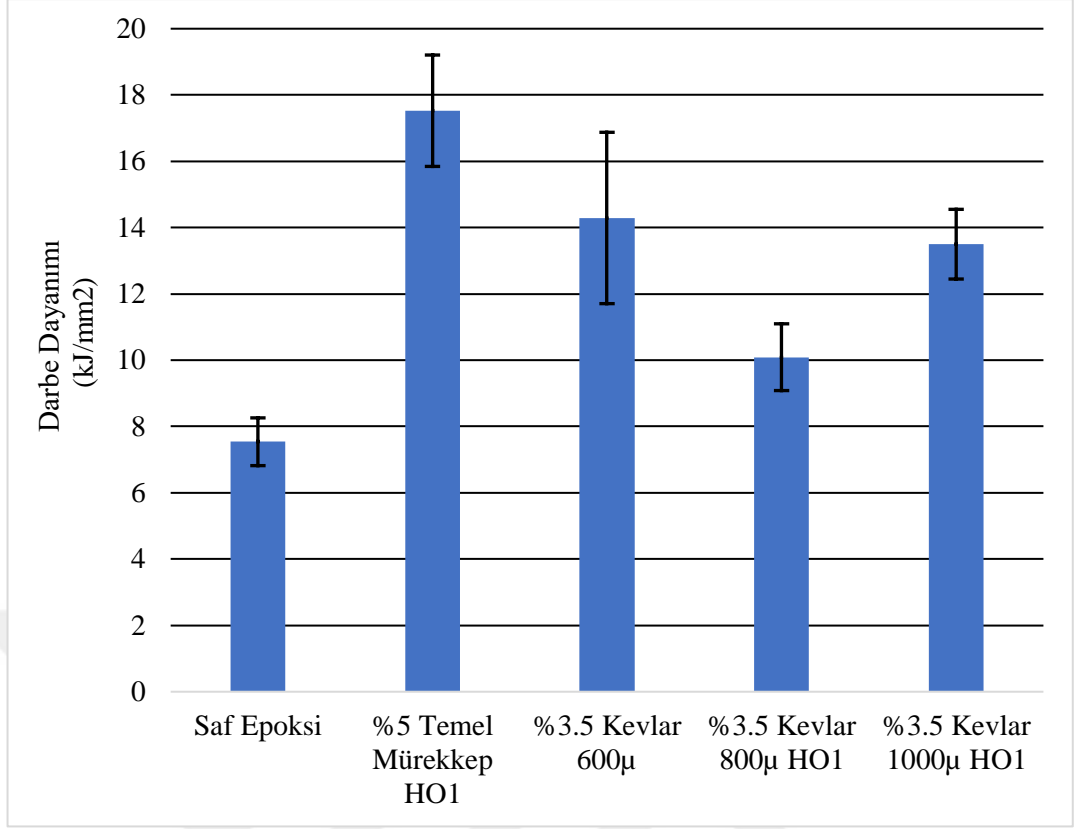
Şekil 3.19 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların darbe testi sonuçları.

Çizelge 3.10 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test grupları	%6,3 Kevlar HO1,5	%3,5 KF HO1,5	%6,3 KF HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1,5	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar HO1,5	0,006	0,273		0,006	0,016
%6,3 Kevlar HO1,5			0,088	0,806	0,006
%3,15 KF %3,15 Kevlar %5NC	0,006			0,011	0,006
%3,5 KF HO1,5				0,221	0,011
%6,3 KF HO1,5				0,086	0,006
%5 Temel Mürekkep HO1,5					0,011

### 3.1.3.3 Fiber uzunluğunun darbe dayanımına etkisi

Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı boylarda Kevlar eklentili numunelerin darbe testi sonuçları Şekil 3.20’de verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.11’de görülmektedir. 600µm fiber uzunluğuna sahip test grubu, 800µm fiber içeren gruba göre anlamlı derecede yüksek ( $p=0,050$ ) darbe dayanımı göstermiştir. 600µm fiber içeren grup 1000µm fiber içeren gruba göre de daha yüksek ortalama darbe dayanımı değerine sahip olsa da iki grup arasında anlamlı fark görülmemiştir ( $p=0,386$ ).



Şekil 3.20 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların darbe testi sonuçları.

Çizelge 3.11 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının darbe dayanımı değerlerine ait MWU testi p değerleri.

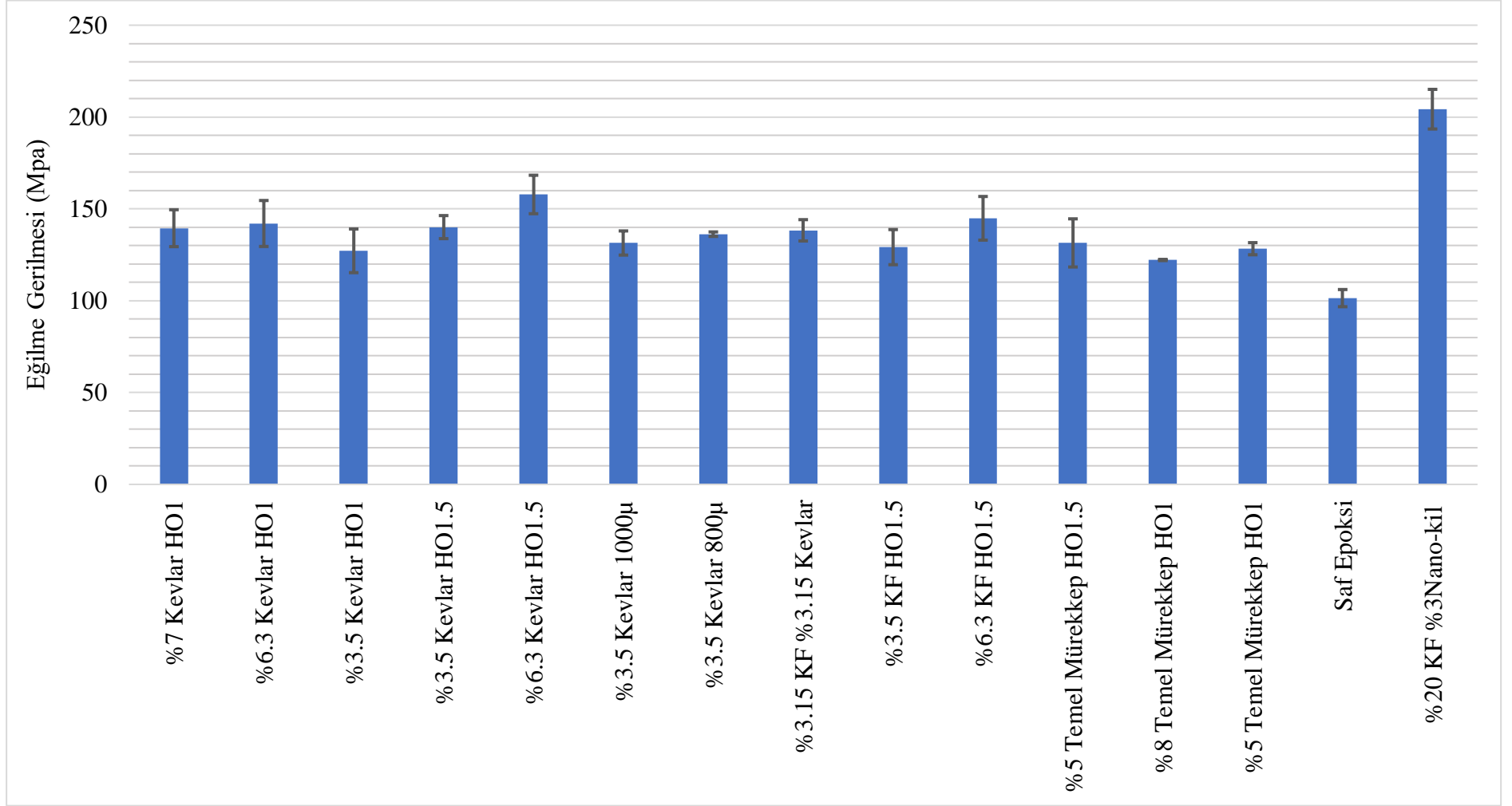
Test grupları	%3,5 Kevlar 1000µm HO1	%3,5 Kevlar 800µm HO1	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar 600µm HO1	0,386	0,050	0,142	0,011
%3,5 Kevlar 1000µm HO1		0,050	0,050	0,011
%3,5 Kevlar 800µm. HO1			0,009	0,100
%5 Temel Mürekkep HO1				0,006

### 3.1.4 3-nokta eğme testi sonuçları

Tüm numune gruplarının 3-nokta eğme testi sonucu elde edilen ortalama gerilme ve hasar anında gerinim değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir. Eğilme dayanımları Şekil 3.21’de, eğilme gerinimleri Şekil 3.22’de grafik olarak ifade edilmiştir.

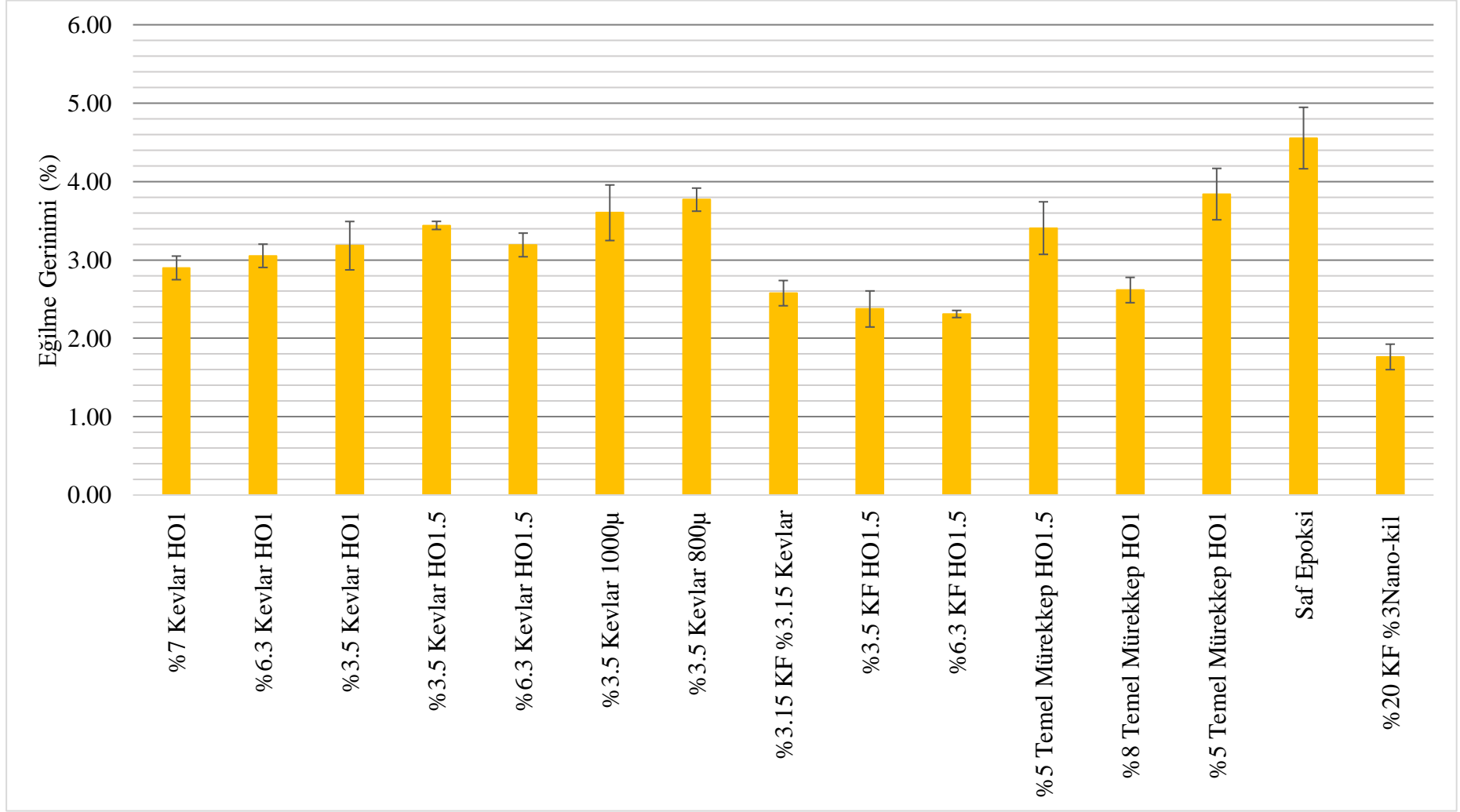
Tablo 3.12 : Tüm numune gruplarının 3-nokta eğme testi ortalama gerilme ve hasar anında gerinim değerleri.

Test Grubu	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Gerinmesi (%)
%7 Kevlar HO1	139,49 ± 10,06	2,9 ± 0,15
%6,3 Kevlar HO1	142,05 ± 12,51	3,05 ± 0,15
%3,5 Kevlar HO1	127,17 ± 11,9	3,18 ± 0,31
%3,5 Kevlar HO1,5	140,07 ± 6,27	3,44 ± 0,05
%6,3 Kevlar HO1,5	157,84 ± 10,47	3,19 ± 0,15
%3,5 Kevlar 1000µm	131,41 ± 6,58	3,6 ± 0,35
%3,5 Kevlar 800µm	136,23 ± 1,22	3,77 ± 0,15
%3,15 KF %3,15 Kevlar	138,33 ± 5,8	2,58 ± 0,16
%3,5 KF HO1,5	129,18 ± 9,56	2,37 ± 0,23
%6,3 KF HO1,5	144,87 ± 11,88	2,31 ± 0,05
%5 Temel Mürekkep HO1,5	131,46 ± 13,11	3,41 ± 0,34
%8 Temel Mürekkep HO1	122,18 ± 0,33	2,62 ± 0,16
%5 Temel Mürekkep HO1	128,31 ± 3,31	3,84 ± 0,33
Saf Epoksi	101,41 ± 4,68	4,55 ± 0,39
%20 KF %3Nano-kil	204,28 ± 10,79	1,76 ± 0,16



Şekil 3.21 : Tüm test gruplarının eğilme dayanımları grafiği.

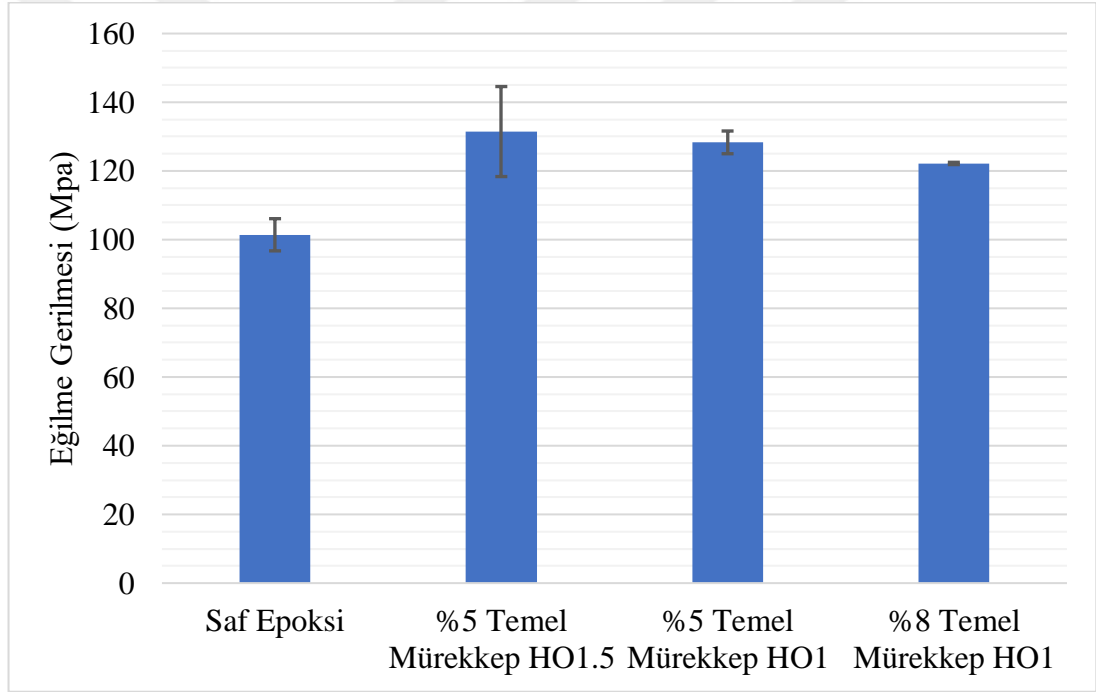




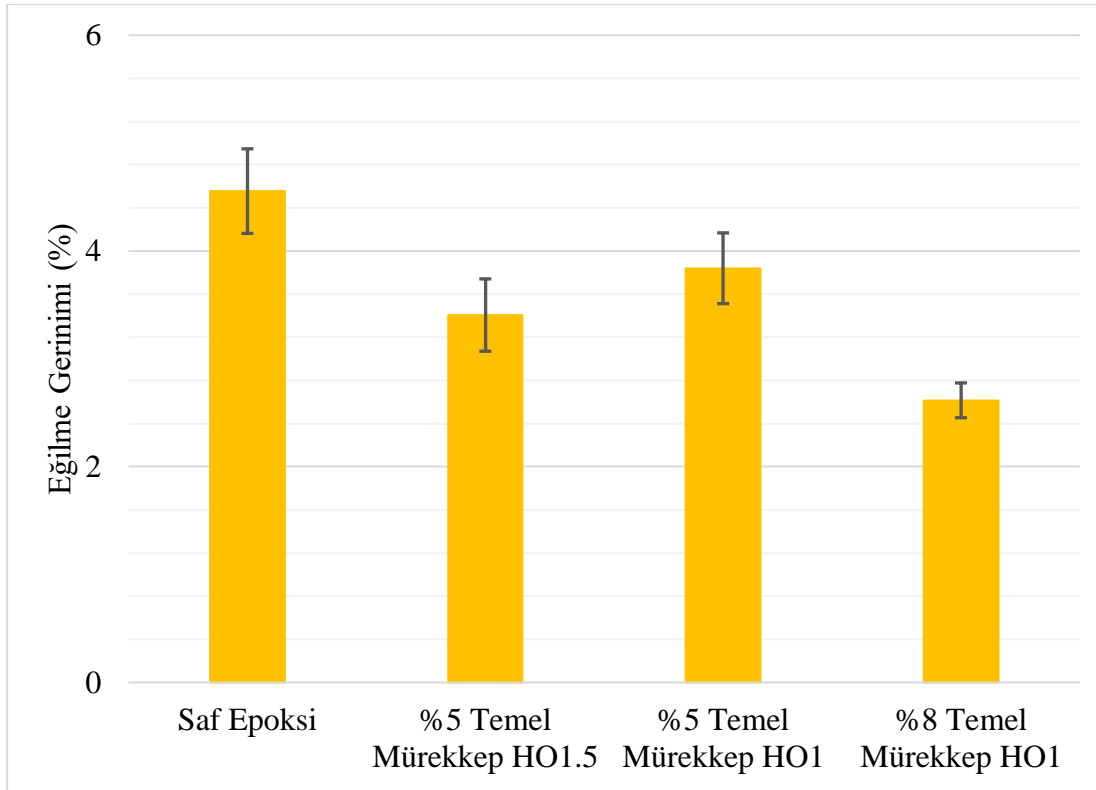
Şekil 3.22 : Tüm test gruplarının eğilme gerinim grafiği.

### 3.1.4.1 HO ve nano-kil oranının 3-nokta eğme dayanımına etkisi

HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı HO ve nano-kil oranına sahip numunelerin eğilme dayanımları Şekil 3.23'te, eğilme gerinimleri ise Şekil 3.24'te verilmiştir. Test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.13'de verilmiştir. Nano-kil eklenmesi %5 oranında eğilme dayanımını arttırmıştır ancak nano-kil oranının %8 artırılmasının eğilme dayanımına pozitif yönde etki etmediği görülmüştür. Ayrıca HO'nun numunelerin eğilme dayanımında anlamlı farklar yaratmadığı görülmüştür. Nano-kil eklenti miktarı ile eğilme gerinimi değerleri arasında negatif korelasyon olduğu görülmüştür.



Şekil 3.23 :HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği.



Şekil 3.24 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği.

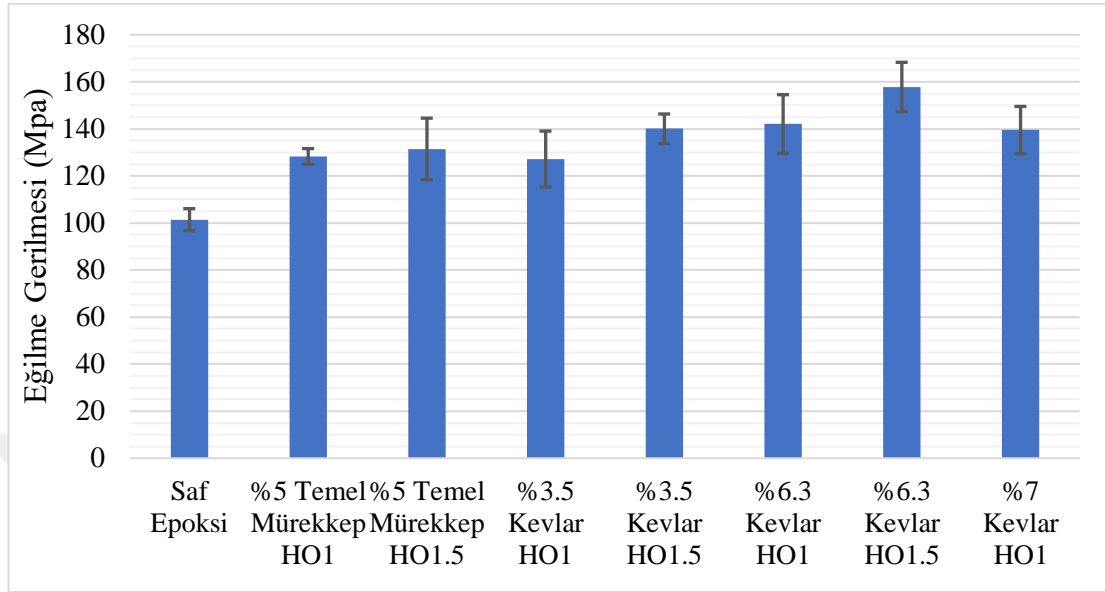
Çizelge 3.13 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test Grupları	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%5 Temel Mürekkep HO1,5	0.513	0,05
%8 Temel Mürekkep HO1	0,05	0,05
%5 Temel Mürekkep HO1		0,05

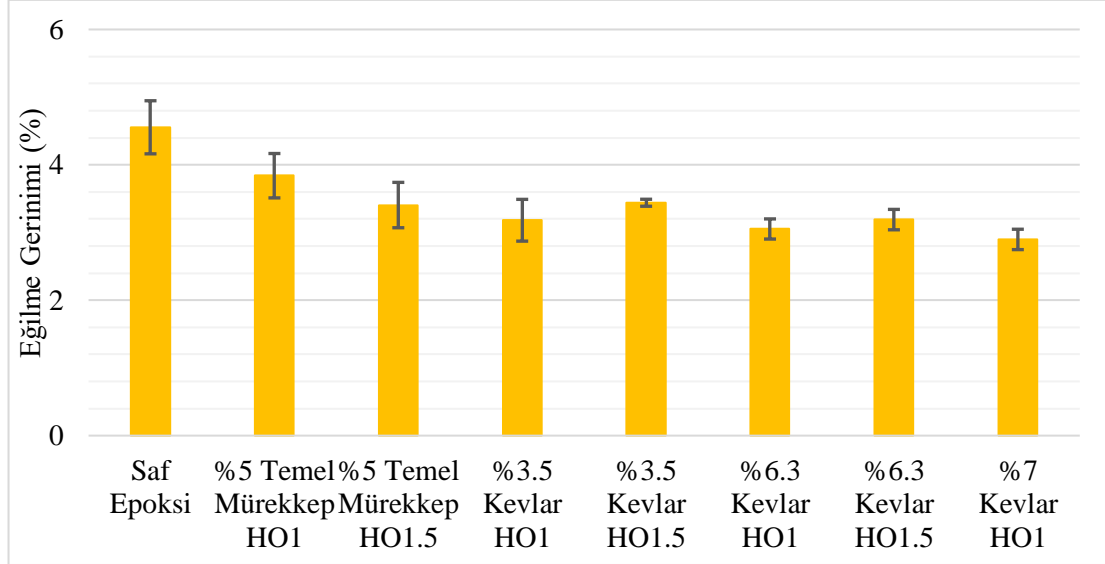
### 3.1.4.2 HO ve Kevlar oranının 3-nokta eğme dayanımına etkisi

HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için farklı HO ve Kevlar oranına sahip numunelerin eğilme dayanımları Şekil 3.25'te, eğilme gerinimleri ise Şekil 3.26'da verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri Çizelge 3.14'de görülmektedir. %6,3 oranında Kevlar eklemek eğilme

gerilimini saf epoksi ve temel mürekkep numunelerine oranla anlamlı miktarda arttırmıştır ancak daha az (%3,5) ve daha fazla (%7) Kevlar fiber eklentisi eğilme geriliminde anlamlı değişikliklere neden olmamıştır.



Şekil 3.25 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme dayanım.



Şekil 3.26 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği

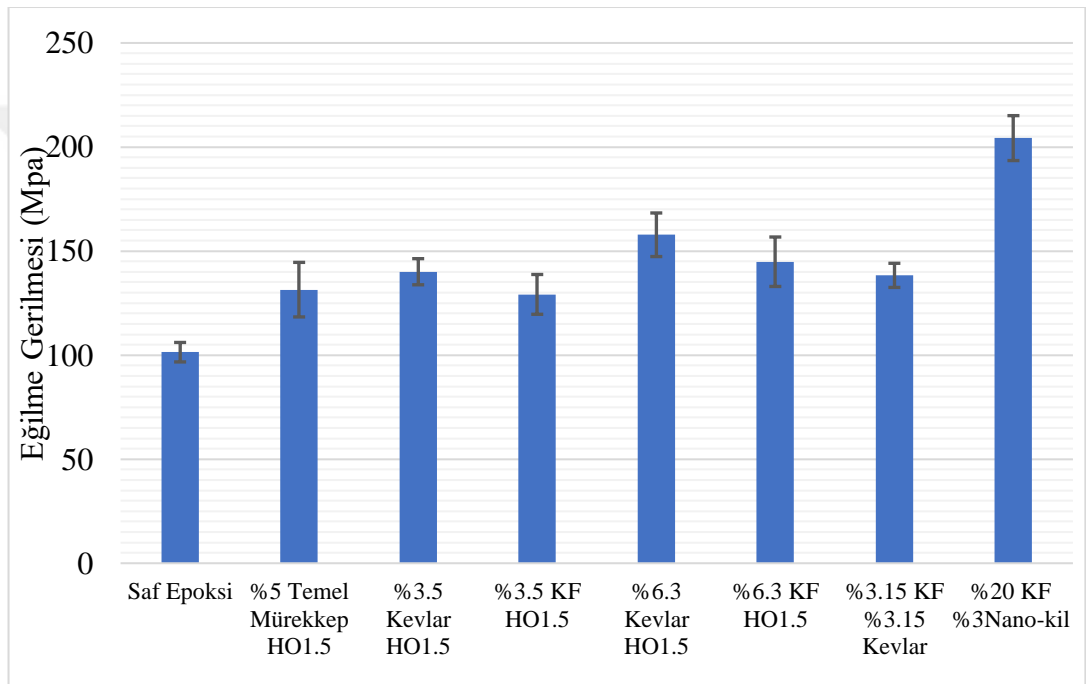
Çizelge 3.14 : HO ve Kevlar Oranının Etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test Grupları	%3,5 Kevlar HO1	%3,5 Kevlar HO1,5	%6,3 Kevlar HO1,5	%7 Kevlar HO1	%5 Temel Mürekkep HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%6,3 Kevlar HO1	0,28		0,08	0,83		0,05	0,05
%3,5 Kevlar HO1		0,16		0,13		0,83	0,05
%3,5 Kevlar HO1,5			0,08		0,48		0,03
%6,3 Kevlar HO1,5					0,03		0,03
%7 Kevlar HO1						0,28	0,05
%5 Temel Mürekkep HO1,5						0,51	0,05
%5 Temel Mürekkep HO1							0,05

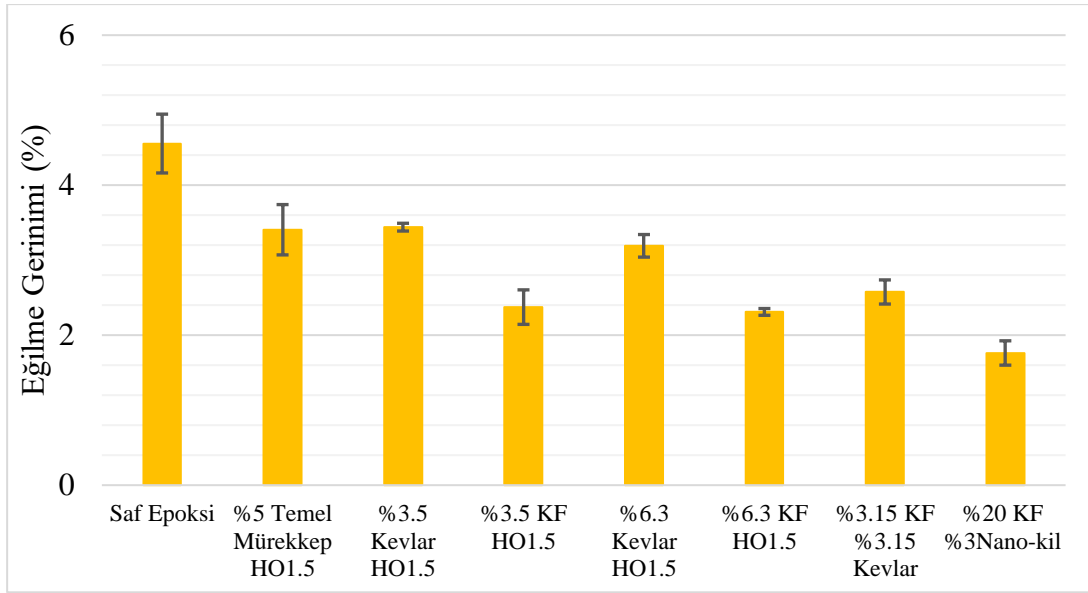
### 3.1.4.3 Farklı fiber türlerinin 3-nokta eğme dayanımına etkisi

Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için karbon fiber ve Kevlar eklentili numunelerin eğilme dayanımları Şekil 3.27’de, eğilme gerinimleri ise Şekil 3.28’de verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.15’de görülmektedir. Fiber eklentili numunelerin eğilme gerilmesi değerleri temel mürekkep numunelerine göre yüksek olsa da sadece %6,5 Kevlar içeren numuneler ile temel mürekkep numuneleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu gözlemlenmiştir ( $p=0,034$ ). Aynı oranda karbon fiber ve Kevlar eklentili numunelerde Kevlar fiber içeren numunelerin ortalama eğilme gerilmesi değeri diğerlerine göre daha yüksek olmasına rağmen aralarında istatistiksel olarak anlamlı farklar olmadığı görülmüştür. Toplamda %6,3 fiber eklentisi olacak

şekilde (%3,15 KF, %3,15 Kevlar) hazırlanan karbon ve Kevlar fiber eklentili test grubunun aynı oranda karbon ya da Kevlar içeren diğer gruplara göre daha düşük eğilme gerilmesine sahip olmasına rağmen sadece Kevlar içeren grup ile arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmüştür( $p=0,027$ ). Tüm diğer numune gruplarına göre çok daha yüksek fiber eklenti oranına sahip olan %20 Karbon fiber %3 nano-kil içeren test grubunun eğilme gerilmesi değerinin diğer test gruplarından istatistiksel olarak anlamlı derece yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu test grubunun eğilme gerinimi değerinin de diğer numunelerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.27 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği



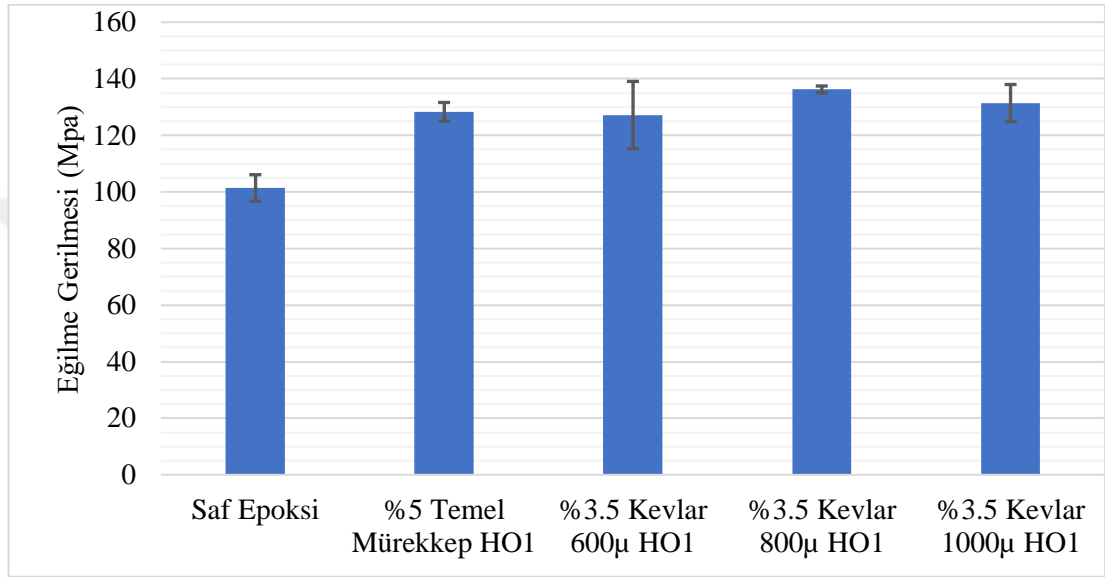
Şekil 3.28 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların eğilme dayanım grafiği

Çizelge 3.15 : Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

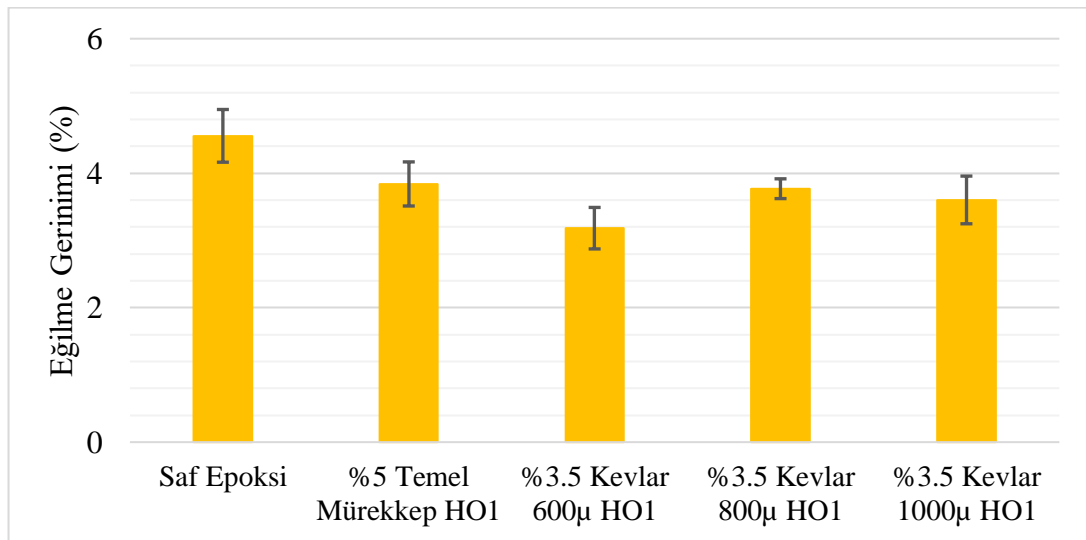
Test Grupları	%6,3 Kevlar HO1,5	%3,15 KF %3,15 Kevlar HO1,5	%3,5 KF HO1,5	%6,3 KF HO1,5	%5 Temel Mürekkep HO1,5	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar HO1,5	0,083		0,149		0,48	0,034
%6,3 Kevlar HO1,5		0,027		0,149	0,034	0,034
%3,15 KF %3,15 Kevlar HO1,5					0,655	0,025
%3,5 KF HO1,5					0,48	0,034
%6,3 KF HO1,5					0,48	0,034
%5 Temel Mürekkep HO1,5						0,05
%20 KF %3Nano-kil						0,05

### 3.1.4.4 Fiber uzunluğunun 3-nokta eğme dayanımına etkisi

Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için farklı boylarda Kevlar eklentili numunelerin eğilme dayanımları Şekil 3.29’da, eğilme gerinimleri ise Şekil 3.30’da verilmiştir. İlgili test gruplarının sonuçları arasındaki farkların anlamlı olup olmadığının belirlenebilmesi için uygulanan MWU testi p değerleri (anlamlılık kriteri  $p < 0,05$ ) Çizelge 3.16’da görülmektedir. Fiber uzunluğunun eğilme gerilimine anlamlı derecede etki ettiği gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.29 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme dayanımları.



Şekil 3.30 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların eğilme gerinim grafiği.



Çizelge 3.16 : Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karşılaştırılan test gruplarının 3-nokta eğme testi gerilme değerlerine ait MWU testi p değerleri.

Test Grupları	%3,5 Kevlar 800µm	%3,5 Kevlar 1000µm	%5 Temel Mürekkep HO1	Saf Epoksi
%3,5 Kevlar 600µm	0,289	0,827	0,827	0,050
%3,5 Kevlar 800µm		0,289	0,034	0,034
%3,5 Kevlar 1000µm			0,827	0,050

### 3.1.5 Yorulma testi sonuçları

Yorulma testlerinde yer alan tüm numune grupları ve test edilen tüm numunelere ait yorulma testi verileri

Çizelge 3.17’de verilmiştir.

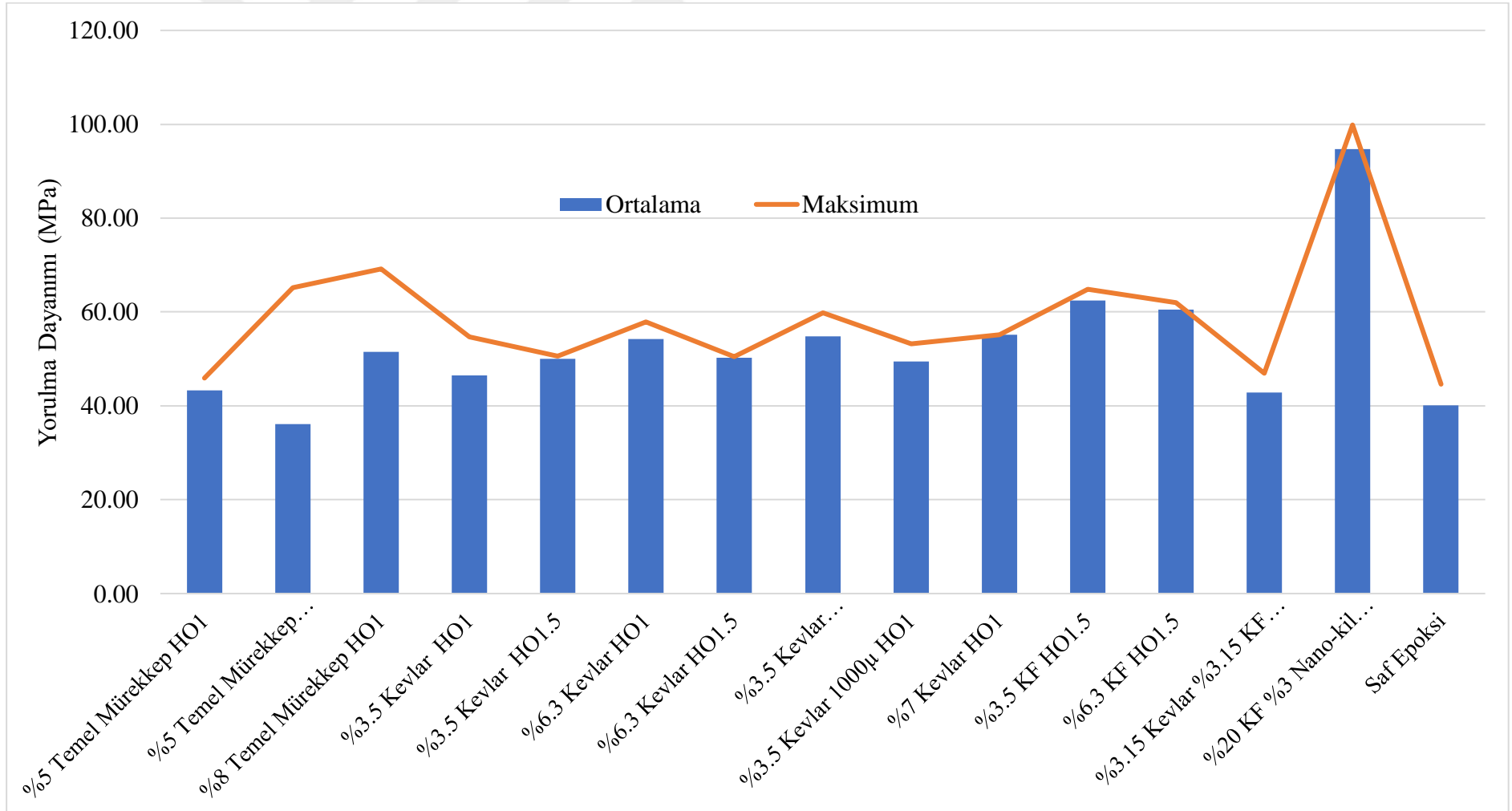
Çizelge 3.17 : Tüm grupların yorulma testi verileri

#	%5 Temel Mürekkep HO1		%5 Temel Mürekkep HO1,5		%8 Temel Mürekkep HO1		%3,5 Kevlar HO1		%3,5 Kevlar HO1,5	
	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>
1	127	80500	112	53	113	490	135	63854	150	9083
2	100	11919	57	45842	58	2000000	70	CKNH	126	1152045
3	77	2000000	30	2000000	90	2000000	70	2000000	CKNH	
4	87	2000000	45	2000000	100	2000000	105	2000000	100	2000000
5	100	1069	57	2000000	113	2000000	120	11200	100	2000000
6	87	2000000	75	2000000	162	1	115	2000000	110	2000000
7			112	2000000	130	12666	120	68058	115	63920
#	%6,3 Kevlar HO1		%6,3 Kevlar HO1,5		%3,5 Kevlar 800µm HO1		%3,5 Kevlar 1000µm HO1		%7 Kevlar HO1	
	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>
1	170	174531	180	4296	141	32858	143	131034	147	27661
2	114	CKNH	140	83593	117	2000000	116	53564	130	2000000
3	114	2000000	112	2000000	126	2000000	97	2000000	135	816372
4	129	935078	129	128810	135	174024	110	2000000	118	810234
5	124	39763	112	2000000	130	15033	116	2000000	CKNH	
6	117	2000000	126	608631	138	2000000	132	424326	118	1683388
7	129	2000000	120	361416	138	69193	114	1460402	105	1189684
#	%3,5 KF HO1,5		%6,3 KF HO1,5		%3,15 KF HO1,5		Saf Epoksi		%20 KF %3 Nano-kil HO1,5	
	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>	<u>Yük</u> (N)	<u>Çevrim</u>
1	136	2000000	144	397849	143	228603	81	1774	CKNH	
2	148	11771	125	2000000	85	2000000	73	CKNH	142	2000000
3	134	163678	135	486540	110	392021	76	2000000	171	2000000
4	130	2000000	126	2000000	85	2000000	88	2000000	208	95710
5	132	2651	134	59120	100	2000000	92	4526	170	40817
6	122	55894	CKNH		110	716967	79	2	140	132627
7	113	812589	130	2000000			81	1142		
8			135	128172			69	2000000		

Numune gruplarında 2 milyon çevrimi tamamlayan numunelerin yorulma dayanımlarına ait veriler Çizelge 3.18’de verilmiş, Şekil 3.31’de ise grafik olarak ifade edilmiştir. Test verilerinden elde edilen SN eğrileri çok sayıda numune grubu olması nedeniyle tek bir grafikte anlaşılır bir şekilde gösterilememiştir. Bu nedenle mekanik özelliklere etki eden üretim parametrelerin incelediği alt başlıklarda sadece ilgili numune grupların olduğu grafiklerde gösterilmiştir.

Çizelge 3.18 : Tüm numune gruplarının ortalama ve maksimum yorulma dayanımları.

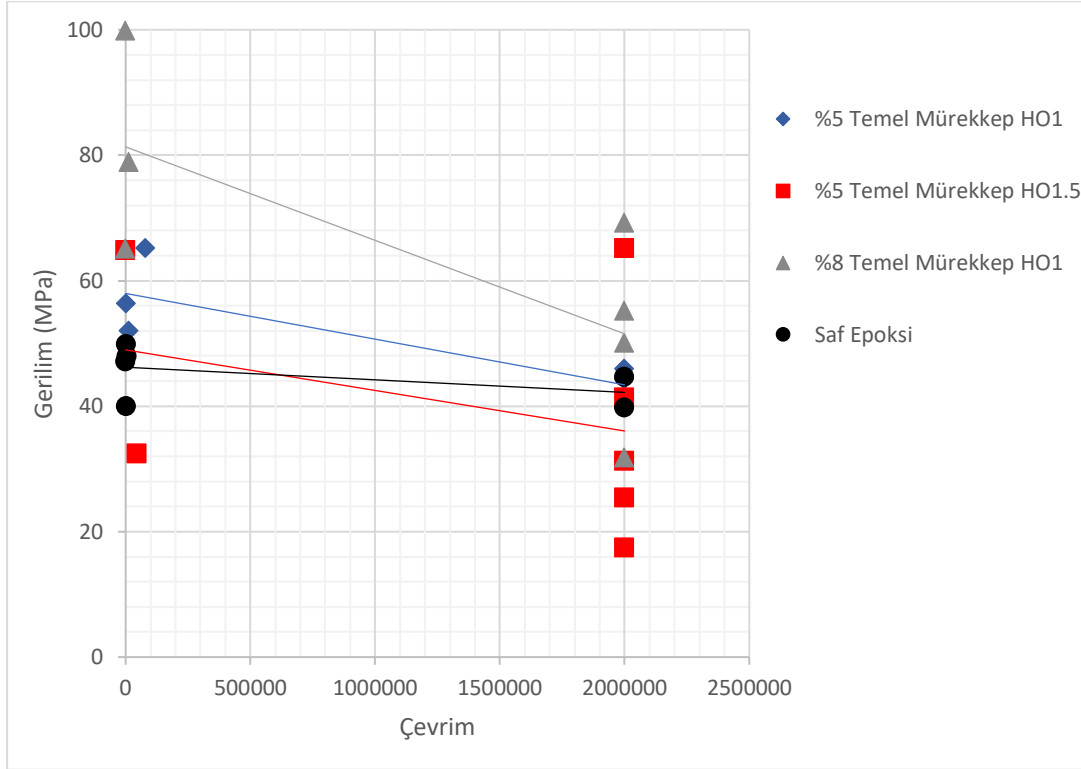
<b>Yorulma Dayanımı (MPa)</b>	<b>%5 Temel Mürekkep HO1</b>	<b>%5 Temel Mürekkep HO1,5</b>	<b>%8 Temel Mürekkep HO1</b>	<b>%3,5 Kevlar HO1</b>	<b>%3,5 Kevlar HO1,5</b>
<b>Ortalama</b>	43,31	36,12	51,54	46,49	50,05
<b>Maksimum</b>	45,88	65,18	69,20	54,70	50,60
<b>SS</b>	3,16	18,42	15,48	11,51	0,55
<b>Yorulma Dayanımı (MPa)</b>	<b>%6,3 Kevlar HO1</b>	<b>%6,3 Kevlar HO1,5</b>	<b>%3,5 Kevlar 800µm HO1</b>	<b>%3,5 Kevlar 1000µm HO1</b>	<b>%7 Kevlar HO1</b>
<b>Ortalama</b>	54,19	50,23	54,80	49,47	55,17
<b>Maksimum</b>	57,94	50,53	59,86	53,26	55,17
<b>SS</b>	4,21	0,42	4,97	4,23	0,00
<b>Yorulma Dayanımı (MPa)</b>	<b>%3,5 KF HO1,5</b>	<b>%6,3 KF HO1,5</b>	<b>%3,15 Kevlar %3,15 KF HO1,5</b>	<b>%20 KF %3 Nano-kil HO1,5</b>	<b>Saf Epoksi</b>
<b>Ortalama</b>	62,44	60,53	42,82	94,67	40,08
<b>Maksimum</b>	64,80	61,95	46,95	99,85	44,61
<b>SS</b>	3,34	1,25	3,60	7,32	4,39



Şekil 3.31 : Yorulma dayanımları ortalama ve maksimum değerleri.

### 3.1.5.1 HO ve nano-kil oranının etkisi

HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için farklı HO ve nano-kil oranına sahip numunelerin SN grafikleri Şekil 3.32’de verilmiştir. %8 temel mürekkep numuneler diğer gruplara göre önemli derecede yüksek maksimum ve ortalama yorulma dayanımı (51,54 MPa, 69,20 MPa) değerine sahip olduğu görülmüştür. %5 temel mürekkep HO1,5 grubunun ortalama yorulma dayanımı değeri ( 36,12 MPa), HO1 %5 temel mürekkep grubundan (43,31 MPa) düşük olmasına rağmen maksimum yorulma dayanımında HO1,5 olan grup (65.18 MPa), HO1 olan gruptan (45,88 MPa) daha yüksek değerlere ulaşarak %8 temel mürekkep grubuna yakın bir maksimum yorulma değeri performansı göstermiştir.

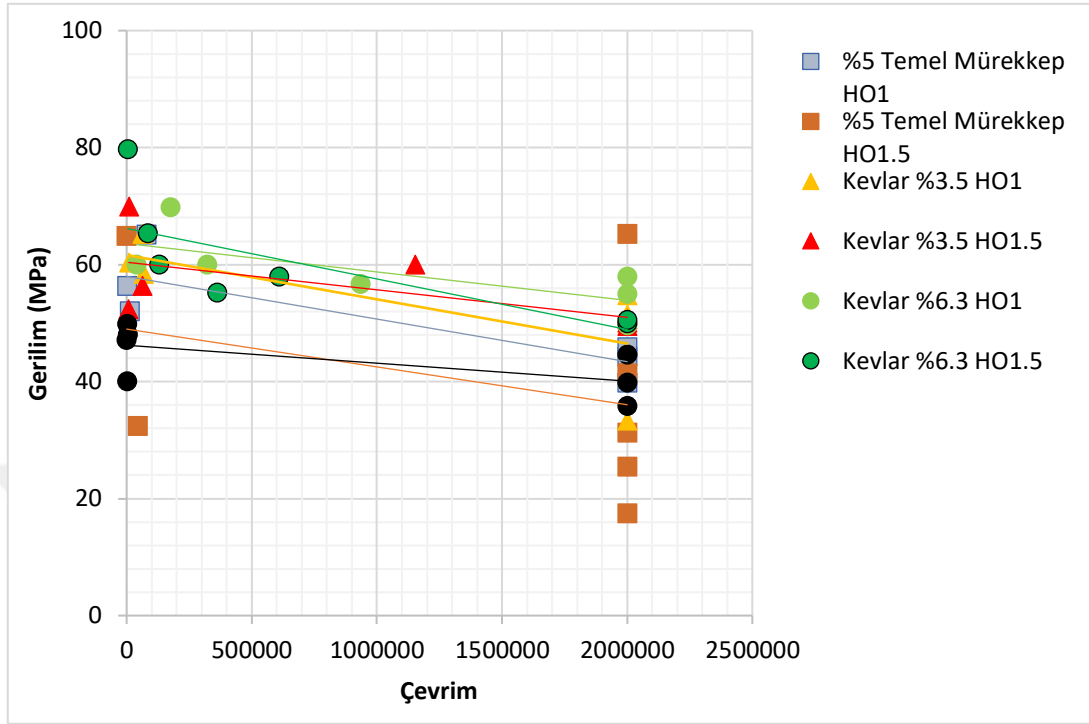


Şekil 3.32 : HO ve nano-kil oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için seçilen grupların SN grafiği.

### 3.1.5.2 HO ve Kevlar oranının yorulma dayanımına etkisi

HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenebilmesi için farklı HO ve Kevlar oranına sahip numunelerin yorulma testi sonuçları Şekil 3.33’te verilmiştir. %3,5 Kevlar içeren gruplarda HO1 olan grup ortalama yorulma dayanımında (46,49 MPa), HO1,5 olan gruba (50,05 MPa) göre daha düşük değere sahip olmasına karşın

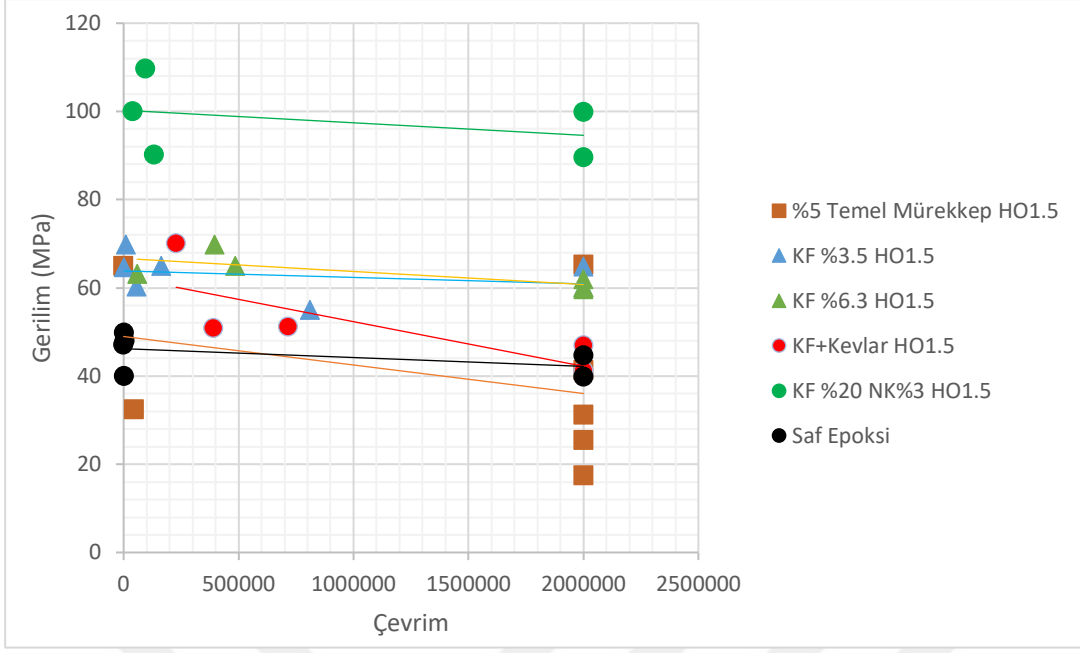
maksimum yorulma dayanımında (sırasıyla 54,70 MPa, 50,60 MPa) daha yüksek değere sahiptir.



Şekil 3.33 : HO ve Kevlar oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için seçilen grupların SN grafiği.

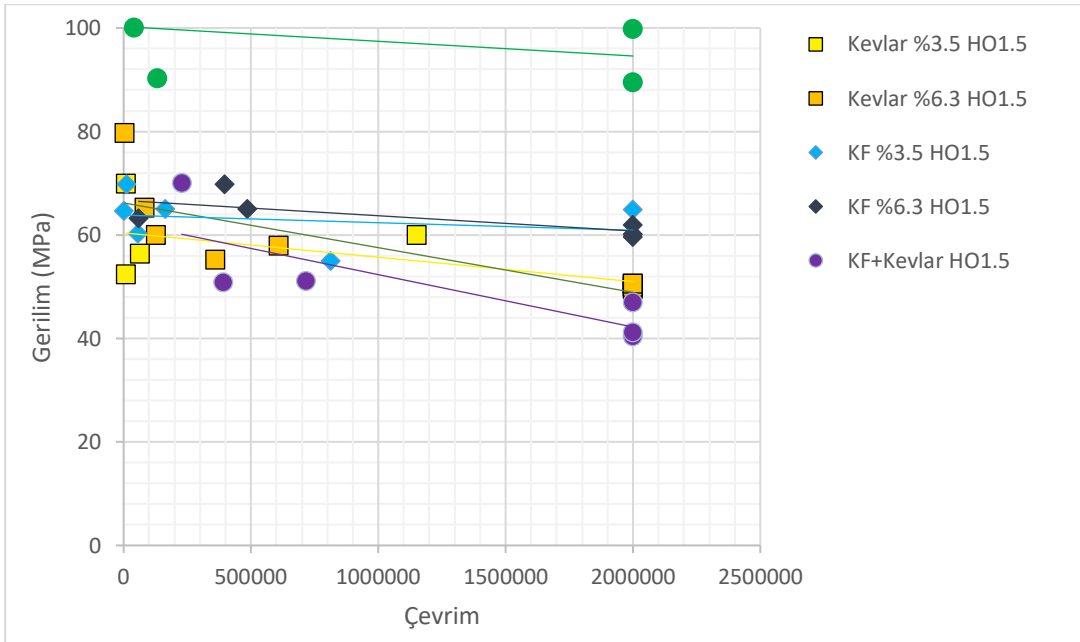
### 3.1.5.3 Farklı fiber türlerinin yorulma dayanımına etkisi

Farklı fiber türlerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için karbon fiber ve Kevlar eklentili numunelerin yorulma testi sonuçlarını gösteren SN grafikleri Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilmiştir. Şekil 3.34'te görüldüğü üzere %20 oranında KF içeren grubun diğer numune gruplarına göre önemli derecede yüksek yorulma dayanımına (94,67 MPa) sahip olduğu görülmüştür. %3,5 ve %6,3 KF eklentili grupların yorulma dayanımlarının çok yakın değerlerde (sırasıyla 64,44 MPa ve 60,53 MPa) olduğu görülmüştür. %3,15 KF ve %3,15 Kevlar içeriğiyle toplam %6,3 fiber bileşeni olan KF ve Kevlar içeren grubunun tüm diğer fiber eklentili gruplardan daha düşük yorulma dayanımına (42,82 MPa) olduğu görülmüştür.



Şekil 3.34 : KF eklentili numunelerin yorulma dayanımları

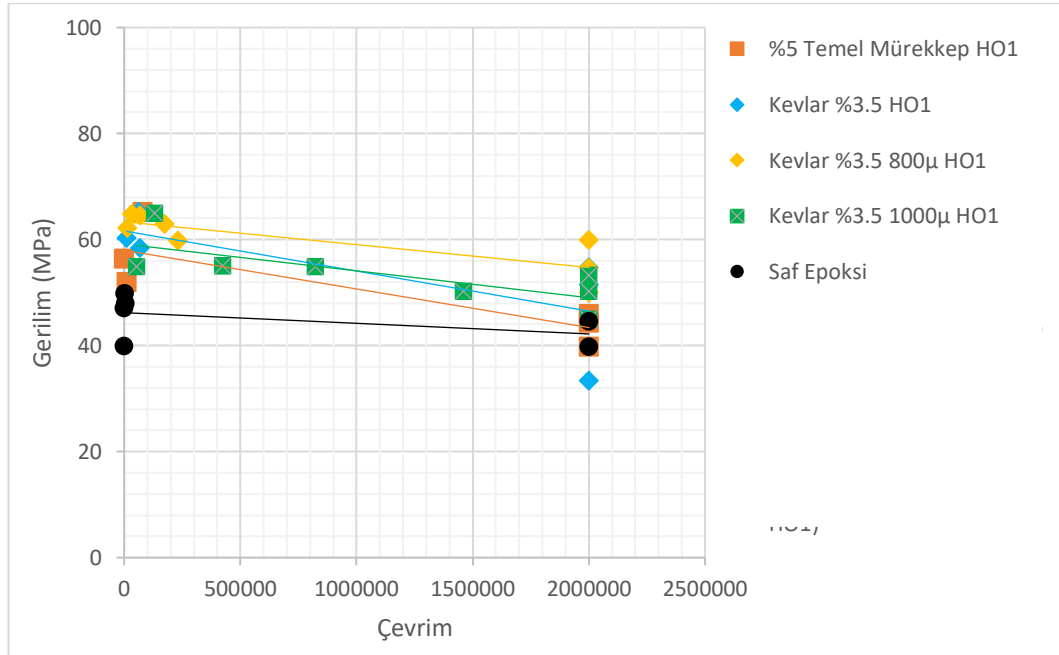
KF içeren gruplar ile Kevlar içeren grupların yorulma dayanımlarının karşılaştırılabilmesi için ilgili numune gruplarının SN grafikleri Şekil 3.35'te verilmiştir. Kevlar içeren numune gruplarının yorulma dayanımlarının KF içeren gruplardan daha düşük olduğu görülmüştür. Toplam %6,3 KF ve Kevlar fiber içeren numunelerin yorulma dayanımlarının sadece Kevlar içeren gruplardan da düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 3.35 : Kevlar ve KF içeren grupların yorulma dayanımları

### 3.1.5.4 Fiber uzunluğunun yorulma dayanımına etkisi

Fiber uzunluğunun mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi için farklı boylarda %3,5 oranında Kevlar eklentili numunelerin yorulma testi sonuçları Şekil 3.36'da verilmiştir. Kevlar fiber uzunluğu belirtilmemiş tüm numuneler 600 $\mu$  uzunluğunda fiberler ile üretilmiştir. Yorulma testleri sonucunda 800 $\mu$  uzunluğunda fiber kullanılan grup, ortalama ve maksimum yorulma dayanımında (54,80MPa, 59,86 MPa) diğer gruplara göre daha yüksek değerlere ulaşmıştır. 600 $\mu$  fiber içeren grup ortalama ve maksimum yorulma dayanımında (46,49 MPa, 54,70 MPa), 1000 $\mu$  gruba göre (49,47 MPa, 53,26 MPa) daha düşük performans göstermiştir. 800  $\mu$  ve 1000 $\mu$  uzunluğunda fiber içeren grupların yorulma performansının 600 $\mu$  içeren gruba göre daha yüksek olması fiber uzunluğunun yorulma dayanımına pozitif etki yaptığını göstermiştir. Ancak 1000 $\mu$  fiber içeren grubun, 800 $\mu$  içeren gruba göre daha düşük yorulma dayanımına sahip olması mürekkep hazırlanma aşamasında karıştırma sırasında oluşan istenemeyen fiber demetleri ile ilişkilendirilmiştir. Kevlar fiberlerin KF aksine karıştırma sırasında kırılması nedeniyle fiber boyunun uzaması, Kevlar fiber içeren mürekkeplerde istenilmeyen fiber demetlerinin daha çok oluşmasına neden olmaktadır. Mürekkep içine homojen dağılmayan bu demetler baskı hatlarında hatalara neden olabilmektedir.



Şekil 3.36 : Farklı uzunluklarda fiber içeren numunelerin SN grafikleri



### 3.2 Değerlendirme

Tez çalışmaları kapsamında DMM ile Kİ metoduyla Kevlar ve karbon fiber eklentiler içeren termoset kompozit yapılar üretilmiştir. 3B baskı ile üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi ve bu mekanik özellikleri etkileyen üretim parametrelerinin incelenmesi için fiber oranı, fiber türü, fiber boyu, nano-kil oranı ve HO gibi farklı üretim parametreleri kullanılarak numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 15 farklı numune grubu belirlenmiş ve yaklaşık 400 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve gerçekleştirilen statik ve dinamik testlerin sonuçları özet olarak verilmiş ve maddeler halinde açıklanmıştır.

- Hız oranının çekme, darbe, 3-nokta eğme ve yorulma testlerinde numune performanslarına anlamlı düzeyde etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Nano-kil, reolojik özelliklerin ayarlanmasını sağlayarak hazırlanan kompozit mürekkebin yazdırılabilirliğine önemli derece etki ederken, nano-kil eklentisinin mekanik özellikler üzerinde de kritik etkilere sahip olduğu görülmüştür. Darbe testlerinde saf epoksi mürekkebe sadece nano-kil eklenmesiyle üretilen temel mürekkep numunelerinin en yüksek darbe enerjisi sönümlene değerlerine sahip olmaları, nano-kil eklentinin numunelere önemli derecede tokluk kazandırdığının göstergesidir. Nano-kil oranının artırılmasının üretilen kompozit numuneler üzerindeki bir diğer etkisi ise numunelerin daha düşük gerinim değerlerinde hasara uğramalarına neden olarak yapıda daha gevrek davranışlara neden olmasıdır. Çekme, darbe, 3-nokta eğme testlerinde bu durum, %8 oranında nano-kil içeren temel mürekkep numunelerinin %5 oranında nano-kil içeren numunelere göre anlamlı derecede ( $p < 0,05$ ) daha düşük dayanım göstermesi bu durumun en net göstergesidir.
- Tez çalışmasının ilk aşamasında test edilen numunelerde statik test sonuçlarında beklenildiği üzere daha yüksek fiber içeren numuneler daha yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Ancak %6,3 Kevlar grubuna göre yaklaşık %45 oranında az fiber içeren %3,5 Kevlar grubu numunelerinin, yorulma testlerinde daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı görülmüştür. Test numunelerinin hasar yüzeylerinde yapılan optik görüntüleme sonucunda %3,5 fiber grubunun %2,05 oranında gözenek içerdiği görülmüştür. %6,3 oranında fiber içeren numunelerde ise bu oranın %3,5 fiber içeren numunelerin

yaklaşık 6 katı olan %12,04 olduğu görülmüştür. Gözenek oranındaki bu dramatik artış, daha yüksek oranda fiber içeren grubun daha düşük yorulma dayanımına ulaşmasına böylece daha düşük dinamik mekanik özellikler göstermesine neden olmuştur.

- Mürekkep hazırlama sürecinin iyileştirilmesinin ardından üretilen test numunelerinde fiber oranının artması; çekme, darbe, 3-nokta eğme ve yorulma testlerinde numunelerin dayanımlarına olumlu yönde katkı sağlamıştır. Yapılan statik ve dinamik testlerde %6,3 oranında fiber içeren numuneler, %3,5 oranında fiber içeren numunelerden daha yüksek ortalama dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Ancak 3-nokta eğme testlerinde %7 Kevlar grubunu ile %6,3 Kevlar grubu arasında anlamlı fark olmamakla birlikte %7 Kevlar grubunun daha düşük ortalama dayanım göstermesi, fiber oranındaki artışın beraberinde getirdiği gözeneklilik artışı gibi düzensizliklerin bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Çalışmalar kapsamında %7'den daha yüksek oranda Kevlar fiber içeren yazdırabilir mürekkep üretilmemiştir.
- Darbe testlerinde fiber içermeyen sadece nano-kil içeren temel mürekkep numune grupları, aynı oranda nano-kile ek olarak %3,5 veya %6,3 oranında Kevlar veya karbon fiber içeren gruplara göre daha yüksek darbe dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Buradan anlaşılacağı üzere mürekkep hazırlama aşamasında fiber eklenmesi nedeniyle oluşma ihtimali artan istenmeyen gözeneklerin, darbe dayanımında önemli derecede negatif etkisi olduğunu göstermiştir. Ancak, fiber eklenmesi ile düşen darbe enerjisi sönümle özelliği fiber oranının %3,5'tan %6,3'e yükselmesiyle artmış ve bu alanda gruplar arasında en iyi performansı gösteren %5 temel mürekkep gruplarına yakın değerlere ulaşmıştır. Bu durum göstermektedir ki fiber eklenmesi ile oluşan istenmeyen gözenekler ile düşen enerji sönümleme miktarı fiber oranın yükselmesi ile telafi edilebilmiştir.
- Yorulma ve 3-nokta eğme testlerinde 800µm ve 1000µm uzunluğunda Kevlar fiber içeren numuneler 600µm uzunluğunda fiber içeren numunelere göre daha yüksek dayanım sergilemiştir. Bu durum beklentiler doğrultusunda, fiber boyu ile mekanik özellikler arasında pozitif korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak bu testlerde 800µm uzunluğunda Kevlar fiber içeren numunelerin 1000µm uzunluğunda Kevlar fiber içeren numunelere göre daha yüksek dayanım değerlerine ulaşması bir tezatlık oluşturmaktadır. Mürekkep

karıştırma işlemi sırasında Kevlar fiberler sünek yapıları sayesinde karbon fiberlerin aksine kırılıma uğramamaktadır. Fiber boyunun artmasıyla, Kevlar fiberlerin istenmeyen fiber demetlerinin oluşturma oranının arttığı ve mürekkep içinde istenmeyen bu demetlerin süreksizliğe sebebiyet vererek statik ve dinamik mekanik özellikleri düşürmektedir.

- 3-nokta-eğme ve çekme testlerinde Kevlar fiber içeren numune grupları aynı oranda karbon fiber içeren numune gruplarına göre daha yüksek dayanımlar göstermişlerdir. Kevlar fiberlerin, karbon fibere göre daha sünek yapıya sahip olması nedeniyle bu sonuçlar beklentilere paralel niteliktedir.
- Darbe dayanımında Kevlar içeren numuneler ve KF içeren numuneler arasında anlamlı derecede fark görülmemiştir. Fiber içeren tüm test gruplarının, fiber içermeyip sadece nano-kil içeren %5 temel mürekkep gruplarına kıyasla daha düşük darbe dayanım performansı göstermeleri ile beraber değerlendirildiğinde, fiber eklentisine paralel olarak artan istenmeyen gözeneklerin oluşturduğu süreksizliğin, numunelerde fiber eklentisinin dayanım üzerine etkisini azalttığı şeklinde değerlendirilmiştir.
- Yorulma dayanımında, karbon fibere göre daha üstün olan Kevlar fiberler içeren kompozit numunelerin yorulma dayanımı performansı beklenen aksine daha düşük olmuştur. Bu sonucun Kevlar fiberlerin epoksi matrislere tutunumunun karbon fibere göre daha düşük olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.
- Tez çalışmasının ilk aşamasında test edilen temel mürekkep numunelerinin 3-nokta eğme dayanım ortalamaları yaklaşık olarak 53 MPa'dır. Yine tez kapsamında mürekkep hazırlama yönteminde yapılan iyileştirme sonucunda elde edilen temel mürekkep numunelerinin 3-nokta eğme dayanım ortalamaları yaklaşık olarak 130 MPa'dır ve tez çalışmalarının başında elde edilen değerlerden %145 oranında daha yüksektir. Mürekkep ve üretim parametreleri kaynaklı daha düşük dayanım değerlerine sahip temel mürekkeplere fiber eklenmesiyle elde edilen numunelerde, fiberlerin mekanik özelliklere etkisi daha bariz bir şekilde görülmektedir. Ancak epoksi matris ve nano-kilden oluşan temel mürekkep yapının dayanım değerlerinin artmasıyla, fiber eklentisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin daha az olduğu 3- nokta eğme ve çekme test sonuçları incelendiğinde görülmektedir. Bu noktada

kompozit numunede fiber dışındaki yapının daha yüksek gerilimlere dayanım göstermesi, bu yüksek gerilim değerlerinde özellikle Kevlar fiber yüzeyi ve epoksi matris tutunumunun düşüklüğünden kaynaklı, fiberlerin pull-out olmasına neden olmaktadır. Bu durum nedeniyle fiberlerin sistemin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin düştüğü sonucuna varılmıştır. Tez çalışmasının ilk aşamasında test edilen %3,5 fiber içeren numunelerin eğilme dayanımları temel mürekkep numunelerinin eğilme dayanımlarından anlamlı derecede yüksektir. Ancak iyileştirilmiş mürekkep hazırlama metoduyla üretilen numunelerde aradaki dayanım farkının ilk aşamada üretilen numunelere göre çok daha az olması bu durumu destekler niteliktedir. İyileştirilmiş mürekkep metoduyla üretilmiş numunelerde %6,3 gibi daha yüksek oranlarda fiber eklentisi, mekanik özelliklerde temel mürekkep numunelerle kıyaslandığında anlamlı derecede farklar ortaya çıkarabilmiştir.

- Kevlar ve karbon fiberlerin beraber kullanımıyla üretilen numuneler, yapılan testlerde benzer oranda Kevlar veya karbon fiber içeren numunelere göre daha iyi dayanım değerleri göstermemiştir.

### 3.3 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için fiber miktarının artırılması beraberinde daha yüksek ekstrüzyon ihtiyacı, daha düşük çözünürlükte baskı ve daha fazla istenmeyen boşluk gibi mekanik özellikleri ve sistem gereksinimlerini olumsuz etkileyen etkenleri beraberinde getirmektedir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için fiber oranının artırılması yerine yapı içerisindeki fiberlerin epoksi matris ile tutunumunun artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır.
- Özellikle in-aktif ve düşük pürüzlülükte yüzeye sahip Kevlar fiber yüzeyi ile epoksi matris arasındaki mekanik ve kimyasal tutunumun artırılması için literatürde bulunan metotların Kevlar fiber yüzeylerine uygulanması ve ilgili metotların kompozit yapıların mekanik özellikleri üzerine etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, KI ile üretilmiş termoset kompozitler konusunda literatüre önemli katkılar yapacaktır.



## KAYNAKÇA

- American Society for Testing and Materials.** (2007). Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 7, 11. <https://doi.org/10.1520/D7264>
- ASTM.** (2022). *Standard Test Method for Unnotched Cantilever Beam Impact Resistance of Plastics. 08.*
- ASTM.** (2015). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.* 1–17. <https://doi.org/10.1520/D0638-14.1>
- Camirero, M. A., Chacón, J. M., García-Moreno, I., & Rodríguez, G. P.** (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.04.054>
- Compton, B. G., & Lewis, J. A.** (2014). 3D-printing of lightweight cellular composites. *Advanced Materials*, 26(34), 5930–5935. <https://doi.org/10.1002/adma.201401804>
- Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P.** (2017). Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.06.004>
- Dou, J., Zhang, Q., Ma, M., & Gu, J.** (2012). Fast fabrication of epoxy-functionalized magnetic polymer core-shell microspheres using glycidyl methacrylate as monomer via photo-initiated miniemulsion polymerization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(19), 3078–3082. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2012.05.005>
- Fallahpour, A., Udony Olugu, E., Nurmaya Musa, S., Yew Wong, K., & Noori, S.** (2017). A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 391–410. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2017.01.005>
- Gu, H., Ma, C., Gu, J., Guo, J., Yan, X., Huang, J., Zhang, Q., & Guo, Z.** (2016). An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(25), 5890–5906. <https://doi.org/10.1039/C6TC01210H>
- Gu, J., Yang, X., Lv, Z., Li, N., Liang, C., & Zhang, Q.** (2016). Functionalized graphite nanoplatelets/epoxy resin nanocomposites with high thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 15–22. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2015.08.081>
- Hmeidat, N. S., Elkins, D. S., Peter, H. R., Kumar, V., & Compton, B. G.** (2021). Processing and mechanical characterization of short carbon fiber-reinforced epoxy composites for material extrusion additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 223, 109122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109122>

- Hmeidat, N. S., Kemp, J. W., & Compton, B. G. (2018).** High-strength epoxy nanocomposites for 3D printing. *Composites Science and Technology*, 160, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.008>
- Hmeidat, N. S., Pack, R. C., Talley, S. J., Moore, R. B., & Compton, B. G. (2020).** *Mechanical anisotropy in polymer composites produced by material extrusion additive manufacturing.* <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101385>
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013).** Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/S00170-012-4558-5>
- Hull, C. W. (1984).** *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.*
- Imeri, A., Fidan, I., Allen, M., Wilson, D. A., & Canfield, S. (2018).** Fatigue analysis of the fiber reinforced additively manufactured objects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(9–12), 2717–2724. <https://doi.org/10.1007/S00170-018-2398-7>
- Kroll, E., & Artzi, D. (n.d.).** *Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models.* <https://doi.org/10.1108/13552541111156522>
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003).** *Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives.* *Cirp Annals*, 52(2), 589–609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6)
- Lewis, J. A., & Gratson, G. M. (2004).** Direct writing in three dimensions. *Materials Today*, 7(7), 32–39. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(04\)00344-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(04)00344-X)
- Li, Y. Y., Li, L. T., & Li, B. (2015).** Direct ink writing of 3-3 piezoelectric composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 620, 125–128. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.124>
- Murphy, S. V., & Atala, A. (2014).** 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 32(8), 773–785. <https://doi.org/10.1038/NBT.2958>
- Nawafleh, N., Elibol, F. K. E., Aljaghtham, M., Oflaz, E., Ciciriello, A. J., Dumont, C. M., Dauer, E., Gorgularslan, R. M., Demir, T., & Celik, E. (2020).** Static and dynamic mechanical performance of short Kevlar fiber reinforced composites fabricated via direct ink writing. *Journal of Materials Science*, 55(25), 11284–11295. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04826-w>
- Pierson, H. A., Celik, E., Abbott, A., De Jarnette, H., Sierra Gutierrez, L., Johnson, K., Koerner, H., & Baur, J. W. (2019).** Mechanical Properties of Printed Epoxy-Carbon Fiber Composites. *Experimental Mechanics*, 59(6), 843–857. <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00498-z>
- Raney, J. R., Compton, B. G., Mueller, J., Ober, T. J., Shea, K., & Lewis, J. A. (2018).** Rotational 3D printing of damage-tolerant composites with programmable mechanics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(6), 1198–1203. <https://doi.org/10.1073/pnas.1715157115>

- Short, D. B. (2015).** Use of 3D Printing by Museums: Educational Exhibits, Artifact Education, and Artifact Restoration. *Https://Home.Liebertpub.Com/3dp*, 2(4), 209–215. <https://doi.org/10.1089/3DP.2015.0030>
- Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., & Ozcan, S. (2014).** *Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing.*  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>
- Thomas, S., Joseph, K., Malhotra, K., Goda, K., & Sreekala, M. S. (n.d.).** Part One Introduction to Polymer Composites. *Polymer Composites*, 1.
- Washington, S. P., Karlaftis, M. G., Mannering, F. L., & Anastasopoulos, P. (2010).** Statistical and econometric methods for transportation data analysis, Second edition. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis, Second Edition*, 1–544. <https://doi.org/10.1201/9781420082869>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012).** A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Wright, W. J., Koerner, H., Rapping, D., Abbott, A., & Celik, E. (2022).** Rapid fiber alignment quantification in direct write printing of short fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 236.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2022.109814>



