

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEÇİCİ LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE KATMANLI OLARAK  
ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK VE KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLGİSAYAR  
DESTEKLİ ANALİZİ İÇİN MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALPEREN BAYRAM**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı**

**AĞUSTOS 2019**



**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEÇİCİ LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE KATMANLI OLARAK  
ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK VE KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLGİSAYAR  
DESTEKLİ ANALİZİ İÇİN MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alperen BAYRAM  
(151080304)**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı**

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Deniz UZUNSOY  
Eş Danışman: Prof. Dr. Bahattin KANBER**

**AĞUSTOS 2019**

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151080304 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alperen BAYRAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SEÇİCİ LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE KATMANLI OLARAK ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK VE KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ İÇİN MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Deniz UZUNSOY** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Eş Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Bahattin KANBER** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. Rukiye ERTAN** .....  
Uludağ Üniversitesi

**Savunma Tarihi :**

**FBE Müdürü :** **Doç. Dr. Murat ERTAŞ** .....  
Bursa Teknik Üniversitesi ...../...../.....

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Alperen BAYRAM

İmzası :

X X X X X



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca her türlü desteği sağlayan ve araştırmalarımaya yön veren saygıdeğer Prof. Dr. Deniz UZUNSOY'a sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalara büyük katkı koyan, bulguları büyük bir hassasiyet ile değerlendiren ve yorumlayan saygıdeğer Prof. Dr. Bahattin KANBER'e şükranı bir borç bilir, teşekkürlerimi sunarım.

Yorucu, uzun ve zorlu bir süreç olan yüksek lisans öğrenimim boyunca, bana gayret ve azim aşıl原因ayan canım annem Hülya BAYRAM'a ve birlikte geçireceğimiz zamandan feragat ederek sabrı ve sevgisiyle beni destekleyen sevgili eşim Hilal BAYRAM'a şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Ağustos 2019

Alperen BAYRAM

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
KISALTMALAR .....	viii
SEMBOLLER .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ŞEKİL LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xiii
SUMMARY .....	xv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>16</b>
1.1 Katmanlı İmalat .....	16
1.1.1 Katmanlı İmalat Yöntemleri .....	17
1.1.1.1 Sıvı Malzeme Kullanılan Katmanlı İmalat .....	18
1.1.1.2 Toz Malzeme Kullanılan Katmanlı İmalat .....	18
1.1.1.3 Katı Malzeme Kullanılan Katmanlı İmalat .....	19
1.2 Polimer Malzemeler için Katmanlı İmalat Uygulamaları .....	19
1.2.1 Çoklu Jet Füzyonu (MJF) .....	19
1.2.2 Seçici Lazer Sinterleme (SLS, LS) .....	19
1.2.3 Ergiyik Biriktirme Modelleme (FDM) .....	22
1.2.4 Malzeme Jeti (MJ) .....	23
1.2.5 Reçine Kürlenme (Stereolitografi- SLA) .....	23
1.3 Lazer Sinterleme ile Katmanlı İmalatta Kullanılan Polimer ve Kompozit Malzemeler .....	24
1.4 Literatür Değerlendirmesi .....	26
<b>2. YÖNTEM .....</b>	<b>29</b>
2.1 Deney Tasarımı ve Planı .....	29
2.2 Numune Tasarımı .....	30
2.3 Numune Üretimi ve Proses Parametreleri .....	32
2.4 Çekme Deneyi .....	34
2.5 Basma Deneyi .....	35
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>37</b>
3.1 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi .....	37
3.1.1 PACF Çekme Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	37
3.1.1.1 Akma Gerilmesi .....	37
3.1.1.2 Çekme Gerilmesi .....	39
3.1.1.3 Kopma Gerilmesi .....	40
3.1.1.4 Poisson Oranı .....	42
3.1.1.5 Elastisite Modülü .....	45
3.1.1.6 Uzama .....	47
3.1.2 PACF Basma Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	48
3.1.2.1 Akma Gerilmesi .....	49



3.1.2.2 Birim Şekil Değişirme .....	51
3.1.2.3 Elastisite Modülü .....	53
3.1.3 PEKK Çekme Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	55
3.2 Bilgisayar Destekli Analiz (Sonlu Elemanlar Analizi ) için Malzeme Modeli Eldesi .....	57
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>58</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>63</b>



## KISALTMALAR

<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ABS</b>	: Akrlonitril Butadin Stiren
<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>CF</b>	: Karbon Fiber
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>DLP</b>	: Dijital Işık İşleme
<b>DPI</b>	: İnç başına düşen nokta sayısı
<b>DOD</b>	: Drop On Demand
<b>FDM</b>	: Eriyik Biriktirme Modelleme
<b>PA</b>	: Poliamid
<b>PACF</b>	: Karbon Fiber Katkılı Poliamid
<b>PEEK</b>	: Polieter-eter-keton
<b>PEKK</b>	: Polieter-keton-keton
<b>PE</b>	: Polietile
<b>PET</b>	: Polietilen-tereftalat
<b>PLA</b>	: Polilaktik Asit
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>PS</b>	: Polistiren
<b>PC</b>	: Polikarbonat
<b>SEM</b>	: Tarama Elektron Mikroskobu
<b>SLS</b>	: Seçici Lazer Sinterleme
<b>SLM</b>	: Seçici Lazer Ergitme
<b>LMD/DED</b>	: Metal Ergiyik Biriktirme
<b>MFJ</b>	: Çoklu Jet Füzyonu
<b>MJ</b>	: Malzeme Jeti
<b>NPJ</b>	: Nanopartikül Püskürtme
<b>ASTM</b>	: Amerikan Malzeme ve Test Cemiyeti
<b>CAD</b>	: (Computer Aided Design) - Bilgisayar Destekli Tasarım
<b>CAE</b>	: (Computer Aided Engineering) - Bilgisayar Destekli Analiz
<b>3B</b>	: Üç Boyutlu
<b>3D</b>	: Three Dimensional

## SEMBOLLER

<b>E</b>	: Elastisite modülü
<b><math>\epsilon</math></b>	: Yüzde uzama
<b><math>\epsilon_1</math></b>	: Birim şekil değiştirme
<b><math>\sigma</math></b>	: Akma gerilmesi
<b><math>\sigma_C</math></b>	: Çekme gerilmesi
<b><math>\sigma_K</math></b>	: Kopma gerilmesi
<b><math>\nu</math></b>	: Poission oranı
<b><math>^{\circ}</math></b>	: Santigrat
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	: Nanomikron
<b><math>\rho</math></b>	: Yoęunluk
<b>in</b>	: İnç
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>g</b>	: Gram
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>X</b>	: X eksenı
<b>Y</b>	: Y eksenı
<b>Z</b>	: Z eksenı
<b>%</b>	: Yüzde

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Deney planı.....	<b>30</b>
<b>Çizelge 2.2</b> : Çekme test numuneleri ölçüleri.....	<b>31</b>
<b>Çizelge 2.3</b> : Basma test numuneleri ölçüleri .....	<b>31</b>
<b>Çizelge 2.4</b> : PACF çekme ve basma numunesi üretim parametreleri. ....	<b>33</b>
<b>Çizelge 2.5</b> : PEKK çekme numunesi üretim parametreleri.....	<b>33</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri akma gerilmesi değerleri.....	<b>51</b>
<b>Çizelge 3.2</b> : BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri birim şekil değiştirme değerleri .....	<b>53</b>
<b>Çizelge 3.3</b> :BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri elastisite modülü değerleri. ....	<b>55</b>
<b>Çizelge 3.4</b> : PEKK çekme deneyi numunelerinden elde edilen tüm değerler.....	<b>56</b>
<b>Çizelge 3.5</b> : Çekme deneyi sonuçlarına göre ortalama değerlere sahip PEKK ve PACF malzeme kartı parametreleri.....	<b>57</b>
<b>Çizelge 3.6</b> : Basma deneyi sonuçlarına göre ortalama değerlere sahip PACF malzeme kartı parametreleri .....	<b>57</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : SLS yöntemi temsili gösterimi .....	20
Şekil 1.2 : FDM yöntemi temsili gösterimi .....	22
Şekil 2.1 : Tez çalışmaları döngüsü .....	29
Şekil 2.2 : Çekme test numunesi .....	30
Şekil 2.3 : CAD ile tasarlanmış çekme numunesi .....	31
Şekil 2.4 : CAD ile tasarlanmış basma numunesi.....	31
Şekil 2.5 : Üretim tablasına konumlandırılmış çekme ve basma numuneleri .....	32
Şekil 2.6 : Üretim tablasına üstten bakışa göre numune sınıflandırma .....	32
Şekil 2.7: Çekme deneyine hazırlanmış PACF numuneleri .....	34
Şekil 2.8 : Çekme deneyine hazırlanmış PEKK numuneleri.....	34
Şekil 2.9 : Çekme deneyi .....	35
Şekil 2.10 : Çekme deneyi tamamlanmış numuneler .....	35
Şekil 2.11 : Basma deneyi .....	36
Şekil 2.12 : Basma deneyi tamamlanmış numuneler.....	36
Şekil 3.1 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) akma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması .....	38
Şekil 3.2 : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri akma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	39
Şekil 3.3 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) çekme gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması. ....	40
Şekil 3.4 : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri çekme gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	41
Şekil 3.5 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) kopma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması.....	42
Şekil 3.6 : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri kopma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	43
Şekil 3.7 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) poisson oranı değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması. ....	43
Şekil 3.8 : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri poisson oranı değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	44
Şekil 3.9 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) elastisite modülü değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması .....	45
Şekil 3.10 : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri elastisite modülü değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması. ....	46
Şekil 3.11 : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) uzama değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması .....	47

<b>Şekil 3.12</b> : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri uzama değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	<b>48</b>
<b>Şekil 3.13</b> : Standarda uygun üretilmemiş PACF basma numuneleri.....	<b>48</b>
<b>Şekil 3.14</b> : Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) akma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması.....	<b>50</b>
<b>Şekil 3.15</b> : Düzlem dışı 0°, 15°, 30°, 90° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri akma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	<b>50</b>
<b>Şekil 3.16</b> : Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) birim şekil değiştirme değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması.....	<b>51</b>
<b>Şekil 3.17</b> : Düzlem dışı 0°, 15°, 30°, 90° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri birim şekil değiştirme değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	<b>52</b>
<b>Şekil 3.18</b> : Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) elastisite modülü değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması.....	<b>53</b>
<b>Şekil 3.19</b> : Düzlem dışı 0°, 15°, 30°, 90° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri elastisite modülü değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması .....	<b>54</b>
<b>Şekil 3.20</b> : Standarda uygun üretilmemiş PEKK çekme numuneleri .....	<b>55</b>
<b>Şekil 3.21</b> : Standarda uygun ölçülerde üretilmemiş PEKK çekme numuneleri .....	<b>55</b>

# SEÇİCİ LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE KATMANLI OLARAK ÜRETİLMİŞ TERMOPLASTİK VE KOMPOZİT MALZEMELERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ İÇİN MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI

## ÖZET

Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yaygın kullanılan katmanlı üretim tekniklerinden biridir. Bu yöntem ile polimer, kompozit ve metal malzemelerin katmanlı olarak üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Düşük ergime sıcaklığına sahip termoplastik malzemeler Lazer Sinterleme yöntemi ile yaygın olarak üretilmekle birlikte Polieter-keton-keon (PEKK) gibi yüksek ısı polimerleri üzerine yapılan çalışmalar gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek ısı polimerlerinin yanısıra karbon fiber katkılı termoplastik kompozit malzemelerin SLS yöntemi ile üretimi de önem kazanmaktadır.

Katmanlı imalat ile üretilmiş ürünlerin Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) ile doğrulanması ürün kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Sanal doğrulama için malzeme modelinin çıkartılması hızlı ve en doğru bir şekilde yapılmalıdır. Malzeme modeli çıkarılması için belirli üretim parametrelerine göre numunelerin üretilmesi ve yine belirli standartta teste tabi tutulmaktadır.

Bu araştırma, yeni ortaya çıkan ürünün CAE ile doğrulanabilmesi amacıyla belirli üretim parametrelerine göre Katmanlı İmalat yöntemlerinden biri olan SLS yöntemi ile farklı oryantasyonlarda üretilmiş termoplastik ve kompozit malzemeleri kıyaslamayı ve değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Termoplastik malzeme olarak PEKK, kompozit malzeme olarak Karbon fiber katkılı poliamid (PACF) malzemesi seçilmiştir.

Araştırma, teste tabi tutulan numunenlerin üretim tablası üzerindeki konumuna göre ortaya çıkan farklı mekanik özelliklerin değişimine ve tespitine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, SLS yöntemi ile önceden belirlenmiş optimum parametrelerde üretilen numunelerin aşıl olarak konumlandırılmasının etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde üretilen malzemelerin üretim tablası üzerindeki konumlarına göre hangi özellikleri taşıyacağı öngörülebilir. PEKK ve PACF malzemesinden SLS yöntemi ile üretilen parçaların makina tablası üzerine nasıl konumlandırılabilirliğini ve buna bağlı olarak tasarımın nasıl optimize edilebileceğini ayrıca yine konuma göre latis yapıların modellenebilmesini sağlamaktadır.

Numuneler, 70 Watt lazer gücüne ve sırasıyla ortalama X:1.034, Y:1.034, Z:1000 DPI çözünürlüğüne sahip araştırma amacıyla geliştirilmiş SLS cihazında üretilmiştir.

Üretim tablasına farklı açılarda konumlandırılarak üretilen PEKK ve PACF numuneleri, çekme ve basma deneylerine tabi tutulmuş ve malzemelerin deney sonuçlarından elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma gerilmesi, poisson oranı, elastisite modülü, % uzama değerleri değerlendirilmiştir.

Bu inceleme sonucunda, SLS cihazında üretilen parçanın şekline veya üretim tablasına konumlandırılmasına göre hangi mekanik değerlere sahip olacağı saptanmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Eklemeli imalat, katmanlı imalat, seçici lazer sinterleme, karbon fiber katkılı polimer, PEKK, PA, çekme testi, 3B yazıcı.





# CREATING MATERIAL MODEL FOR COMPUTER AIDED ANALYSIS OF THERMOPLASTIC AND COMPOSITE MATERIALS ADDITIVELY MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER SINTERING PROCESS

## SUMMARY

Selective Laser Sintering (SLS) is one of the most widely used additive manufacturing techniques. With this method, the production of polymer, composite and metal materials can be realized.

Thermoplastic materials with low melting temperature are widely produced by Laser Sintering method, but studies on high-temperature polymers such as Polyether-ketone-ketone (PEKK) are becoming more common. In addition to high-temperature polymers, the production of carbon fiber reinforced thermoplastic composite materials by SLS method is gaining importance.

Computer Aided Engineering (CAE) of products manufactured with additive manufacturing directly affects product quality. The material model for computer aided engineering should be done quickly and accurately. The material model is subjected to the production of samples according to the specific production parameters and also to a certain standard for the removal of the material model.

This study aims to compare and evaluate thermoplastic and composite materials produced on different orientation by Selective Laser Sintering method which is one of Additive Manufacturing methods according to predetermined production parameters in order to validate the new product by CAE. PEKK was used as thermoplastic material and Carbon fiber doped polyamide (PACF) was used as composite material.

The research focuses on the change and detection of different mechanical properties of the tested samples based on their position on the production table. In this context, the effect of angular positioning of the samples produced with the pre-determined optimum parameters by the Selective Laser Sintering method was investigated.

As a result of the data obtained, which properties will be produced according to the production position on the production table can be predicted. Selective Laser Sintering from PEKK and PACF material can be used to determine how the parts to be produced can be positioned on the machine table and accordingly the design can be optimized.

The samples were produced on an SLS device developed for researching purposes with 70 Watt laser power and average resolution of X: 1.034, Y: 1.034, Z: 1000 DPI respectively.

PEKK and PACF samples produced by placing them at different angles on build table were subjected to tensile and compression tests and yield stress, tensile stress, tensile stress, poisson ratio, elasticity modulus,% elongation values obtained from the test results of the materials were evaluated.

In this examination, the mechanical properties of part will be determined according to shape or position of the part placed on the build table of SLS machine.

**Key words:** Additive manufacturing, selective laser sintering, carbon fiber doped polymer, PEKK, PA, tensile test, 3d printer.

## 1. GİRİŞ

Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ortamında üç boyutlu katı modeli oluşturulan parça, programlar vasıtasıyla ince katmanlar haline getirilerek üç boyutlu yazıcı ile üretilerek nesne haline getirilmektedir. Kullanılacak katmanlı imalat yöntemine bağlı olarak parça katman katman malzeme uygulanarak üretilmektedir. Üretimde kullanılacak malzemeler üç boyutlu yazıcı teknolojisindeki yöntemlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Parçanın geometrisine ve teknik istelerine bağlı olarak hangi katmanlı imalat yöntemi ve araçların kullanılacağı belirlenmelidir [1].

Katmanlı imalat yöntemleri, geleneksel teknolojilere göre tasarım özgürlüğü ve üretiminde daha fazla esneklik sunmaktadır. Katmanlı imalat ile karmaşık parçalar üretilebilir, mevcut karmaşık parçaların üretimi hızlandırılabilir ve talaş kaldırma ve ilave işlemler gerekmeden hızlı bir üretim gerçekleştirilebilir. Ayrıca, katmanlı imalat ile tasarım-üretim döngüsü kısaltılmakta dolayısıyla üretim maliyeti düşürülerek rekabet gücü arttırılabilmektedir.

Katmanlı imalata yönelik termoplastik ve kompozit malzemelerden üretilen parçalar genel olarak bilgisayar ortamında doğrulanmadan direkt olarak bastırılmaktadır. Hassas ve dar toleranslı ölçülere sahip parça üretimi gerçekleştirilmeden önce üretilecek parçanın doğrulanmış olması gerekmektedir. SLS yöntemi ile üretilecek parçanın doğrulanmasında malzeme ve proses bilgisi büyük öneme sahiptir. Malzemelerin SLS prosesi sonucu göstereceği davranışların tecrübe edilmemiş olması sebebiyle ürünün hassas parça istelerini sağlayıp sağlayamadığı bilinmemektedir. Bunun için farklı proses parametrelerinde deney numuneleri üretilerek malzeme davranışı saptanmakta ve malzemeye özel en iyi proses parametreleri çıkarılmaktadır. Parça üretiminde kullanılacak proses parametresi belirlenmiş ise, bu proses parametresindeki malzeme özellikleri Bilgisayar Destekli Analiz (CAE) için kullanılır.

### 1.1 Katmanlı İmalat

Katmanlı imalat, ilave üretim araçlarına gerek duymadan çeşitli malzemelerin katman katman yığılması/biriktirilmesi suretiyle üretimini sağlayan bir teknolojidir. Plastik

türlerinin yanı sıra sanayide sıkça kullanılan metal, seramik ve bazı kompozit malzemeler katmanlı imalat yöntemleri ile üretilmektedir. Katmanlı imalat, savunma, havacılık, otomotiv, tıp, gibi sektörlerde hızlı ve ucuz prototipleme ve amaçları ile kullanılmaktadır [20].

1990'larda, polimer tabanlı katmanlı imalat teknolojilerinin ortaya çıkması ile, bu teknolojiler endüstride prototipleme amacıyla kullanıma başlanmıştır. 1995'lere gelindiğinde doğrudan metal tozu katılaştırma tekniği endüstride metal parça üretimi noktasında yer almıştır. 1990'ların sonlarında toz içerisinde katmanların lazer yardımıyla tamamen eritilerek oluşturulması yöntemi geliştirilmiştir. Böylece lazer ile katılan eriyikten daha mukavim parçalar elde edilmiştir.

Polimer malzemelerin ilk üretilen parçalarda kullanımı ve düşük erime sıcaklığına sahip olmaları sebebiyle polimer malzemeler için kullanılan teknoloji ve yöntemlerin diğer malzemelere nazaran daha fazla olgunlaştığı görülmektedir. Endüstride katmanlı imalatta kullanılan polimer malzemeleri, metal ve kompozit malzemeler takip etmektedir.

### **1.1.1 Katmanlı imalat yöntemleri**

Katmanlı imalata yönelik birçok yöntem bulunmakla birlikte literatürde bu yöntemler, kullanılan malzemeye, malzeme işleme şekline ve imalat makinası sistemine göre sınıflandırılabilir.

Eklemeli üretime ait teknolojiler hangi tipte malzeme kullandığı, üretim şekline ve malzemenin hangi şekilde kaynaştırıldığı veya sertleştirildiğine göre yedi alanda toplanmaktadır. Bu sıralama American Society for Testing and Materials (ASTM) International Committee F42 tarafından 2012 yılında belirlenmiştir. Yapılan sıralamaya göre şu şekilde teknolojiler sınıflandırılmıştır [2, 3].

- Fotopolimerizasyon (Photopolymerization )
- Malzeme Püskürtme (Material Jetting)
- Yapıştırıcı Püskürtme (Binder Jetting)
- Levha Laminasyon (Sheet lamination)
- Malzeme Ekstrüzyon (Material Extrusion)
- Toz Zeminde Füzyon (Powder Bed Fusion)

- Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Direct Energy Deposition)

Literatürde ayrıca, katmanlı imalatta kullanılan malzeme çeşidine görede bir sınıflandırılma yapılmaktadır. Bu başlığın devamında katmanlı imalatta kullanılan hammadde türlerine göre sınıflandırılan yöntemler temel olarak anlatılmıştır.

#### **1.1.1.1 Sıvı malzeme kullanılan katmanlı imalat**

Sıvı hammadde kullanılan katmanlı imalat yönteminde, katı bir model oluşturmak üzere ışığa duyarlı polimerler, seçici biçimde ışık vasıtasıyla kürlenmektedir. Her ne kadar bu modellerin yüzey kalitesi ve doğruluğu, enjeksiyonla kalıplanmış benzerleriyle karşılaştırılabilecek kadar yüksek olsa da, fiziksel özellikleri zamanla ve ışığa ve kullanım şartlarına göre değişmektedir. Modellerin fiziksel özelliklerinde bu değişiklik genellikle bu ışığa duyarlı malzemelerin, özellikle güneş ışığına maruz kaldıklarında sürekli olarak sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [4].

#### **1.1.1.2 Toz malzeme kullanılan katmanlı imalat**

Toz malzeme kullanılan katmanlı imalat yöntemlerinde temel yaklaşım, toz formundaki malzemelerin lazerle sinterlenmesi, elektron ışınları, kızılötesi radyasyon ile seçici olarak sinterlenmesi/ergitilmesi üzerinedir. Bunlara ilave olarak bazı yöntemlerde ise katmanlı üretilmiş veya üretilecek bu toz halindeki katmanlara bağlayıcı bir malzeme de uygulanabilmektedir. Toz malzeme kullanılan yöntemlerde, toz halindeki malzeme aynı zamanda çıkıntılı ve karmaşık şekilli parçalar için bir destek görevi görmekte, dolayısıyla ya daha az destek yapı kullanılmakta ya da destek yapı hiç kullanılmaktadır.

Toz malzeme kullanılan katmanlı imalat yöntemleri, ilave üretim prosesleri boyunca en geniş materyal yelpazesine sahiptir. Malzemeler metallere, polimerlere, seramiklere ve çeşitli alaşım ve kompozitlere kadar çeşitlilik göstermektedir. Bazı malzemelerin üretiminden sonra ilave işlem gerektirebilmekte, bazı yöntemlerde ise direkt olarak nihai ürün elde edilmektedir.

Seçici Lazer Sinterleme/Seçici Lazer Ergitme (SLS, SLM), Metal Ergiyik Biriktirme (LMD, DED), Çoklu Jet Füzyonu (MFJ) ve Malzeme Jeti (MJ) endüstride yaygın kullanılan toz malzeme kullanılan yöntemlerdendir.

### **1.1.1.3 Katı malzeme kullanılan katmanlı imalat**

Katı malzeme kullanılan katmanlı imalat yöntemleri, katı halde kesilmiş ve belirli bir düzende sıkıştırılmış/haddelenmiş/ektrüze edilmiş sürekli malzeme yığınlarının veya granül biçiminde veya bir ağızlıktan filament halinde parçaların eritilerek katman katman birbiri üzerine işlenmesini kapsamaktadır.

## **1.2 Polimer Malzemeler için Katmanlı İmalat Uygulamaları**

Bu bölümde endüstride sıkça kullanılan polimer malzeme kullanan temel katmanlı imalat yöntemlerini inceleyeceğiz. Temel olarak kullanılan yöntemler endüstrideki isimleri ile aşağıdaki gibidir.

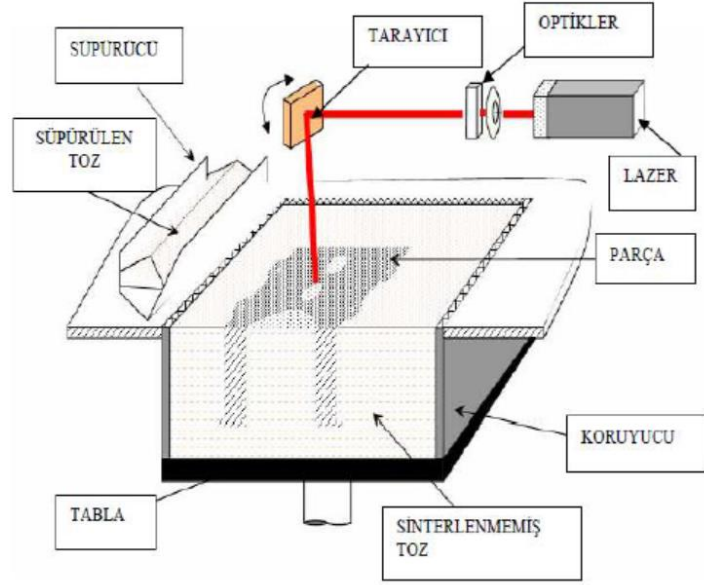
### **1.2.1 Çoklu jet füzyonu (MJF)**

Bu yöntemde, sistem haznesinden serilen plastik tozun üzerine saniyeler içinde milyon damlacık halinde ajan/yapıştırıcı malzemenin eritilmesi ve daha sonra ajan üzerine bir katman daha plastik toz serilmesi döngüsünü kapsamaktadır. Yöntemde yer alan kürlenme sistemi ile ajanlar plastik malzemeye zarar vermeyen uygun sıcaklıkta kürlenmekte ve iki toz katmanı arasında yapıştırıcı görevi görmektedir.

### **1.2.2 Seçici lazer sinterleme (SLS, LS)**

Seçici Lazer Sinterleme, lazer enerjisi kullanılarak gerçekleştirilen tabakalı üretim tekniklerindedir. Bu yöntemde, parçanın meydana getirilmesi için bir güç kaynağı olarak bir lazer tarafından seçmeli olarak toz malzeme sinterlenmektedir.

Bu sistemde alaşım tozu bir yatak üzerine yığılır (Şekil 1.2). Toz yatağının üzerinden geçen bir silindir ya da seviyeleme sistemi yardımı ile toz yatağına sabit kalınlıkta alaşım tozu yerleştirilmesi sağlanır. Şuanki teknolojiye toz alaşım katmanının kalınlığı 20-100 µm aralığında olmakla birlikte ortalama 0.1 mm katman kalınlığı ile üretim gerçekleştirilmektedir. Daha hızlı üretim yapabilmek için geliştirilen galvano aynaların yönlendirdiği lazer demeti tekli veya çoklu olarak üretilecek nesneyi oluşturmak üzere her tabakadan sonra toz yatağının belirlenmiş bölümlerini tarayarak sinterlemektedir. Nesne tamamlanana kadar bu döngü devam etmektedir [5].



**Şekil 1.1 : SLS yöntemi temsili gösterimi [6]**

SLS yöntemi ile parça üretiminde özel destek yapılarına, diğer yöntemlere kıyasla ihtiyaç duyulmamaktadır. Bazı polimer türlerinde katılma hızına bağlı olarak veya üretilecek nesnenin tasarımına göre destek yapı ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir. Her bir katmanın üretimi tekrarlandıkça oluşan katmanlar ve katmanlar arasında kalan tozlar doğal bir destek görevi üstlenmektedir. Yalnız nesnenin tablaya göre konumlandırılması için tabla ile nesne arasında kaba destek yapılar kullanılabilir.

Üretimden sonra parça etrafında veya içinde serbest halde bulunan tozlar, üretimden sonra manuel olarak fırça veya vakumlu emici yardımıyla alınmaktadır. Üretilen parça rijit yapıda olduğundan kütleme gibi ilave bir işleme ihtiyacı duymaz. Yalnız metal parçalarda parça dayanımı artırılması için tavlama gerçekleştirilebilir. Üretilen parçanın çarpılmaması için üretim bittikten sonra parça soğumaya bırakılmalıdır.

Termoplastik malzemeler düşük erime sıcaklıkları ve düşük erime viskozitelerine sahip olması nedeniyle lazer sinterlemesi için çok uygundur. Polyamid (PA), polipropilen (PP), polistiren (PS), polikarbonat (PC), polieter-eter-keton (PEEK) ve polieter-eter-eter-keton (PEKK) gibi polimerler geliştirilmiş ve lazer sinterleme için kullanılmıştır. Bununla birlikte, mevcut lazer sinterleme materyallerinde sınırlamalar vardır. Bu yöntemde kullanılacak sınırlı polimer ve kompozit türü mevcuttur.

Poliamidler (PA11, PA12 ve PA22) şu anda en yaygın kullanılan lazer sinterleme malzemeleridir. Bu poliamidler düşük ergime sıcaklığında işlenebildiğinden

kullanılacak makinada üretim sıcaklığı düşük olacak bu nedenle bu malzemeleri üreten katmanlı imalat makinası daha ucuz olacaktır. Poliamidlerin ucuz üretimi ve istenilen elastik özelliklere sahip olması sebebiyle çalışmalara devam edilmiş ve poliamid türevli birçok kompozit malzeme ortaya çıkmıştır. Özellikle Poliamid malzemelerin fiber katkı ile dayanımı arttırmak ve lazer ile üretilebilir bir proses elde etmek başlıca araştırma konularından olmuştur.

SLS yöntemi havacılık, savunma, uzay sanayisi, otomotiv, tıp, askeri donanım ve kuyumculuk, elektronik gibi sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

SLS Yönteminin Avantajları:

- SLS ile metal parçaları imal etmek mümkündür,
- Geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilmesi çok zor karmaşık geometriye sahip parçalar üretilebilmektedir.
- Detaylı tasarımların hasas imalatı gerçekleştirilebilmektedir.
- Parçanın yüzeyinin kalitesi katman kalınlığına bağlı olarak yüksektir.
- Yüksek dayanıma sahip parçalar üretilebilmektedir.
- Destek yapılar ihtiyacı duyulmadan üretim gerçekleştirilebilmekte böylece tasarım ve imalat sonrası işçilikten kazanç sağlanabilmektedir.
- İmalat sonrası işçilik diğer yöntemlere göre daha azdır.

SLS Yönteminin Dezavantajları:

- SLS yöntemi ile çalışan makineler pahalıdır.
- Diğer üretim yöntemlerine kıyasla imalat maliyeti (malzeme, amortisman, süre vb. maliyetler) daha yüksektir.
- Mevcut teknolojide seri imalata uygun değildir.
- İmal edilen parçalara nihai işlem (ısıtma işlemi, kumlama vb.) uygulama ihtiyacı mevcuttur.
- İmal edilen parçalar imalat sıcaklığına ve parça soğuma süresine göre çarpılabilmektedir.
- Parçaya bağlı olarak imalattan sonra parçanın soğuması için belirli bir süre beklenebilmektedir.

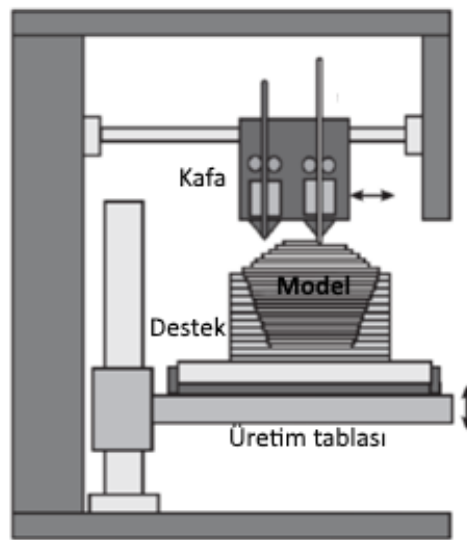
### 1.2.3 Eriyik biriktirme modelleme (FDM)

Yığıma işlemi, fused deposition modeling (FDM) adını verdiğimiz bir işlemdir ve malzemenin filament halinde nozul adı verilen kısımdan geçerek ısıtılması ve eritilerek katman katman üst üste dökülmesi ile parçanın oluşumunu kapsar.

Katman kalınlığı genellikle 0,2-1 mm aralığındadır. Yığıma işlemi, üretim tablasının katman kalınlığı kadar aşağı inmesi ile yeniden başlar ve parça inşa edilene kadar bu çevrim devam etmektedir. FDM tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli Şekil 1.2’de görülmektedir.

Yığıma işleminde plastik malzeme katılma noktasının hemen üstünde bir sıcaklığa eritilir ve böylece oluşan her bir tabaka, bir önceki tabakaya yarı eriyik halde yapıştırılmaktadır. Plastik hammadde (filamentlerin veya granüllerin) beslenme hızları kontrol edilebilmektedir. Katman kalınlığı, parçanın tasarımına ve isterlerine, kullanılan sarf malzemenin özelliğine, nozul çıkış çapına, nozulu taşıyan kafanın hızına ve ekstrüzyon basıncına göre değişiklik göstermektedir [7].

FDM tekniğinde genel olarak ABS, PLA, PA, PET, PE adını verdiğimiz polimer malzemeler kullanılırken, diğer tekniklerde metal ve alaşımları dâhil olmak üzere birçok çeşit malzemenin kullanımı mevcuttur. Diğer üretim teknolojilerine kıyasla karışık proses işlemlerine ihtiyaç duymamaktadır. Diğer üretim teknolojilerinde üretilmesi planlanan parçanın geometrisi için çok dikkatli ve ayrıntılı çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.2 : FDM yöntemi temsili gösterimi [8]



#### **1.2.4 Malzeme jeti (MJ)**

Malzeme püskürtme (jetleme), ışığa veya ısıya maruz kaldığında katılaştıran (stereolitografiye benzer bir şekilde) fotopolimerler ile birlikte metallerin veya balmumunun kullanılması, imal edilen parçaların birlikte bir katman oluşturulmasını sağlamaktadır. Malzeme püskürtme üretim prosesi, farklı malzemelerin aynı parça içinde kalmasını da sağlamaktadır [9].

Yazıcı kafasındaki yüzlerce küçük nozuldan fotopolimer malzeme püskürtülerek katman üzerine katman oluşturulacak parça üretilmektedir. Püskürtülen malzemeler üretim tablasına bırakıldığında UV ışığı ile kürlenmekte ve katılaştırılmaktadır. Bu yöntemde destek yapıları çokça kullanılmaktadır. Destek materyali daha sonra işleme aşaması sırasında veya sonrasında özel yöntemler ile çıkarılmaktadır. Bu yöntem, aynı parçada birden fazla renk ve malzeme kullanımına imkan sunmaktadır [9].

Drop On Demand (DOD), PolyJet by Objet, NanoParticle Jetting (NPJ) uygulamaları, malzeme jeti yöntemini içeren endüstriyel uygulamalardır [9].

#### **1.2.5 Reçine kürlenme (stereolitografi- SLA)**

Fotopolimer malzeme lazer ışını vasıtasıyla seçici olarak kürlenmekte ve katmanlar katılaştırılmaktadır.

Kullanılan sıvı polimer, mor ötesi ışık altında kimyasal tepkime göstererek katı hale dönüşmektedir. Lazer ışını belirlenmiş bölgelere noktasal olarak uygulanmakta ve sıvı malzemenin ışın ile temas eden bölgeleri kürlendirilerek katılaştırılmaktadır. Bir katmanın inşası tamamlandığında üretim tablası aşağıya indirilir ve yeni bir kat üzerindeki polimer katılaştırılır. Kürlenme esnasındaki malzemenin yapışkan özelliği sayesinde katmanlar birbirine yapışmaktadır. Parça inşası tamamlanıncaya kadar çevrim devam etmektedir. Destek yapılar katılaştırılan malzemedan olacak şekilde parça ile birlikte imal edilmektedir. Üretim tamamlandığında destek yapıların hepsi parça üzerinden temizlenmektedir. Üretim esnasında polimerde yüksek derecede bir kürlenme meydana getirilmemektedir. Üretim sonrasında parça UV lamba altında bir süre daha kürlendirilmektedir. Çok hassas ve ince katmanlı parçaların üretimi bu yöntem ile gerçekleştirilebilmektedir [10].

Bu yöntem ile çalışan tüm uygulamalar genellikle yukarıda anlatıldığı gibi imalat yapmaktadır. Dijital Işık İşleme (DLP), Stereolitografi'ye benzer bir yöntem olup fotopolimerlerle çalışan bir 3D baskı işlemidir. Kullanılan malzemeye özel ışık ile kürlenme sağlayarak katmanları oluşturmaktadır. Fotopolimer malzeme bir projektör kullanılarak seçici olarak işlenmektedir. DLP'de Stereolitografi'ye kıyasla daha sığ bir reçine maddesi kullanılması yeterlidir. Böylece daha az atık ve düşük maliyet elde edilmektedir.

### **1.3 Lazer Sinterleme ile Katmanlı İmalatta Kullanılan Polimer ve Kompozit Malzemeler**

Araç hafifliği otomotiv, savunma ve havacılık sektörlerinde her zamanki gibi büyük öneme sahiptir ve gelecekte araç hafifliği daha da ön plana çıkacaktır. AB, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için otomotiv sektörüne özgü emisyon mevzuatlarını yıllar boyunca uygulamada tutmuştur. Bunun yanında Paris Anlaşması'nın ardından, Çin, ABD ve Japonya gibi ülkeler düşük karbonlu taşımacılık için iddialı politikalar uygulamaya başlamıştır. Kurulan komisyon çevreden sanayiye CO<sub>2</sub> emisyonları ile ilgili tüm faktörleri ve aktörleri ele almak için entegre bir yaklaşım izlemektedir. 2020'den sonraki dönemde Avrupa Birliği'nde binek otomobiller ve hafif ticari araçlar için yeni CO<sub>2</sub> emisyon standartları hayata geçecektir.

Havacılık sektöründe ise ağırlık azaltımı konusu, çok daha kritik öneme sahip olmakla birlikte havacılık için olmazsa olmaz kaidelerden biridir.

Endüstride hafifliği elde etmek amacıyla metal malzeme yerine polimer, kompozit veya farklı metal alaşımları kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu yaygınlaşma katmanlı imalat sektörüne yansımakta ve mekanik değerleri daha iyi kompozit veya polimerlerin araştırılmasının önünü açmaktadır.

Polimerlerin, uzun raf ömrü, üstün tokluk, yüksek geri dönüşüm kapasitesi ve kolay depolama gibi avantajları bulunmaktadır. Yoğunlukları düşük olan polimerler kullanılarak karmaşık şekilli parçaları üretmek kolaydır. Ayrıca polimerlerin montajı ile talaşlı olarak işlenmesi kolay ve ucuzdur. Fakat genel olarak mekanik özellikleri ve termal dayanımları düşüktür. Kompozit malzemelerin üretilmesinde büyük oranda (yaklaşık % 90) polimer esaslı matrisler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde polimer matris olarak kullanılan polimerler; termosetler ve termoplastiklerdir [11, 12].

Bu bölümde, lazer sintelermede (LS, SLS) kullanılan polimer ve kompozit malzemelerin özelliklerini inceledik.

Yüksek mol kütlesi ve kristalliğine sahip sentetik bir termoplastik olan poliamid (PA), mühendislik plastiklerinin en önemli gruplarından birini oluşturmaktadır. Birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmakta olan poliamidler; cam elyaf ve benzeri elyaflar ile kuvvetlendirilmiş, ısıl dayanımı yüksek, çeşitli viskozite değerlerinde, mineral dolgulu, kauçuklu ve UV dayanımlı olmak üzere çok geniş bir ürün çeşitliliği sunmaktadır.

Lazer sintelermede (LS, SLS) yaygın olarak uygulanan SLS tozu PA12'dir. PA 12 veya PA 12 bileşikleri (kuru karışımlar) endüstriyel tüketimin yaklaşık % 70 ila %90'ı kadardır. Piyasada kalan tutarı ise PA11, PA22 ve katkılı PA malzemeler almaktadır. PA11, yüksek darbe dayanımına ve kopma uzamasına sahip çevre dostu bir termoplastiktir. PA12 ise PA11'e göre daha iyi mekanik özellik gösteren ve aşınma dayanımı daha iyi olan başka bir poliamiddir.

Karbon fiber (CF) katkılı poliamid (PACF), kahverengi, sertliği ve dayanıklılığı yüksek antrasit bir malzemedir. Dayanım olarak PA malzemeden çok daha iyidir fakat enerji emme kabiliyeti ve esnekliği daha düşüktür. SLS yöntemi ile üretilmesi oldukça güçtür. Üretimde lazer ile çokça temas eden yüzeylerin kırılabilirliği yüksek ölçüde artmaktadır.

Cam (fiber) katkılı poliamid, beyaz renkte olup sertlik ve aşınma direnci yüksek olan malzemedir.

Alüminyum katkılı poliamid, yüksek katılık sağlamakla birlikte talaşlı imalata çok uygun işleme kolaylığı var olan kompozit malzemedir.

Polieter-eter-keton (PEEK) ve Polieter-keton-keton (PEKK), moleküler omurgası keton ve eter grupları içeren yüksek sıcaklık stabilitesi ve yüksek mekanik mukavemete sahip yarı kristal termoplastik ailesidir. Havacılık ve tıp endüstrisinde yüksek sert ve hafif talepleri karşılayabilecek termoplastik malzemeler olarak kullanılmaktadır. Karmaşık geometriye parçalar özellikle seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi ile bu malzemelerden üretilmektedir. SLS ile üretilen bu parçaların

mekanik dayanım özellikleri, enjeksiyonla kalıplanmış kısımlarından bariz olarak daha düşük çıkmaktadır. [13]

PEEK ve PEKK genellikle, tıbbi alet veya implant üretimi ayrıca havacılık alanında kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle enjeksiyonlu kalıplama gibi geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmektedir. Bu malzemelerin lazerle sinterlenmesi ve proses optimizasyonu oldukça zordur.

Karbon fiber katkılı PEEK (PEEKCF) malzeme, yüksek mekanik mukavemete sahip olmakla birlikte yüksek termal direnç, daha düşük elektriksel iletkenlik, aşınma dayanımı ve çok düşük nem içirme gibi özelliklere de sahiptir.

Karbon fiber katkılı PEKK (PEKKCF) malzeme gelişmiş bir mühendislik polimeri olarak kabul edilmektedir. CF, PEKK malzemeye daha düşük bir erime noktası ve daha yavaş kristalleşme sağlamak ile birlikte yüksek kristalleşme sıcaklığının sabit kalabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca CF, polimer yapısının mekanik ve baskı özelliklerini iyileştirerek yapısal kararlılığı arttırmaktadır.

PEBA (TPA), esnek fakat katı olmakla birlikte strese ve yorulmaya karşı dirençli bir malzemedir. PEBA, -40° ile 90° aralığında sıcaklık dayanımına sahip kauçuk benzeri toz bir malzeme olup SLS yöntemi için üretilmiştir.

Düşük maliyetli olmasıyla birlikte, SLS için iyi bir kimyasal dirence ve kararlı bir kimyasal yapıya sahiptir. Dayanıklı ve kauçuk benzeri yapısıyla, ayakkabı ürünleri, spor malzemeleri, tıbbi gereçler veya otomotiv parçaları üretiminde kullanılabilir. El destekleri, iç tabanlar, kısıkaçlar, tutamaklar ve contalar için de kullanılabilir.

#### **1.4 Literatür Değerlendirmesi**

Patrice Peyre 2015 yılında SLS sürecine dahil olan temel olayları ve parametreleri ortaya koymak amacıyla iki polimerin seçici lazer sinterlemesi (SLS) sırasında elde edilen füzyon derinlikleri ve elde edilen füzyon derinliklerini tahmin etmek üzerine deneysel-sayısal bir yaklaşım öne sürmüştür. Özel olarak tasarlanmış bir SLS kurulumunda katmanları üretmek için optimum işlem koşullarının belirlenmesini sağlamıştır. Farklı deney koşulları için tek katmanlardaki füzyon derinlikleri ve termal

kamera ile sıcaklık ölçümleri dikkate alınarak elde edilmiştir. PA12 ve PEKK malzemeler için kristalizasyon hızları, erimeye etkiyen bazı üretim parametreleri ve ergiyik özellikleri incelenmiştir. Temel Beer-Lambert'in ısı biriktirme denkleminin toz yatağındaki hem lazer emilimini hem de difüzyonu içeren verim oranının, doğru füzyon derinliklerini ve iki polimer için ısı döngülerini belirlemek için yeterli olduğu ortaya koyulmuştur [14].

Mengxue Yan ve Xiaoyong Tian 2018 yılında, SLS ile yüksek mukavemetli karbon fiberler (CF) ile güçlendirilmiş PEEK kompozitlerini SLS yöntemi ile üretmek için CF / PEEK kompozitlerinin sinterleme kinetiğini ve yüksek sıcaklık reolojik davranışını incelenmiştir. Simüle edilmiş sıcaklık dağılımının viskozite-sıcaklık ilişkisi ile birleştirilmesiyle yeni bir etkin erime bölgesi tanımlanmış ve proses planlamasını öngörmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, CF / PEEK kompozitlerinin çekme dayanımı, enjeksiyon ile kalıplanmış saf PEEK'ten % 85 daha yüksek bir elastisite modülüne,  $109 \pm 1$  MPa'ya ulaşmıştır [13].

Xiaohu Deng 2018 yılında, polieter-eter-keton (PEEK) malzeme baskısı için özelleştirilmiş bir FDM sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sistemde baskı hızı, tabaka kalınlığı, baskı sıcaklığı, dolgu/malzeme biriktirme oranı gibi parametreler analiz edilmiştir. Ayrıca, optimize edilmiş koşullar altında gerçekleştirilen mekanik testlerde PEEK örneklerinin uygun mekanik özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır [15].

A. A. Zhansitov, A. L. Slonov ve R. A. Shetov 2018 yılında, farklı moleküler kütesine sahip polietereterketon (PEEK) malzemeleri yüksek sıcaklıkta polikondensasyon yoluyla sentezlemiştir. PEEK malzemelerin termal ve fiziko-mekanik özelliklerinin içsel viskoziteye bağımlılıkları incelenmiştir. SLS teknolojisinde kullanmak üzere yüksek kaliteli 3D baskı için gerekli özelliklere sahip PEEK toz malzemesinin sentez koşulları belirlenmiştir [16].

M. Schmidt ve T. Rechtenwald 2007 yılında, SLS ile PEEK üretimi üzerine sistem teknolojisi ve malzeme modifikasyonlarını ve proses uygulamalarını değerlendirmiştir. Sıcaklık ve enerji girişi ile ilgili işlem sınırları gösterilmiştir. Mekanik özellikler üzerindeki sıfırdan % 15'e kadar değişebilen gözenekliliğin etkisi anlatılmıştır [17].

S.Berretta, K.E.Evans ve O.Ghita 2015 yılında lazer ile sinterlenmiş PEEK ve HP3 PEK malzemelerini mekanik performanslarına göre incelemiştir. Lazer sinterlenmiş PEEK numuneleri, HP3 PEK malzemesine kıyasla gerilme mukavemetinde % 25 daha düşük bir performans göstermiştir [21].

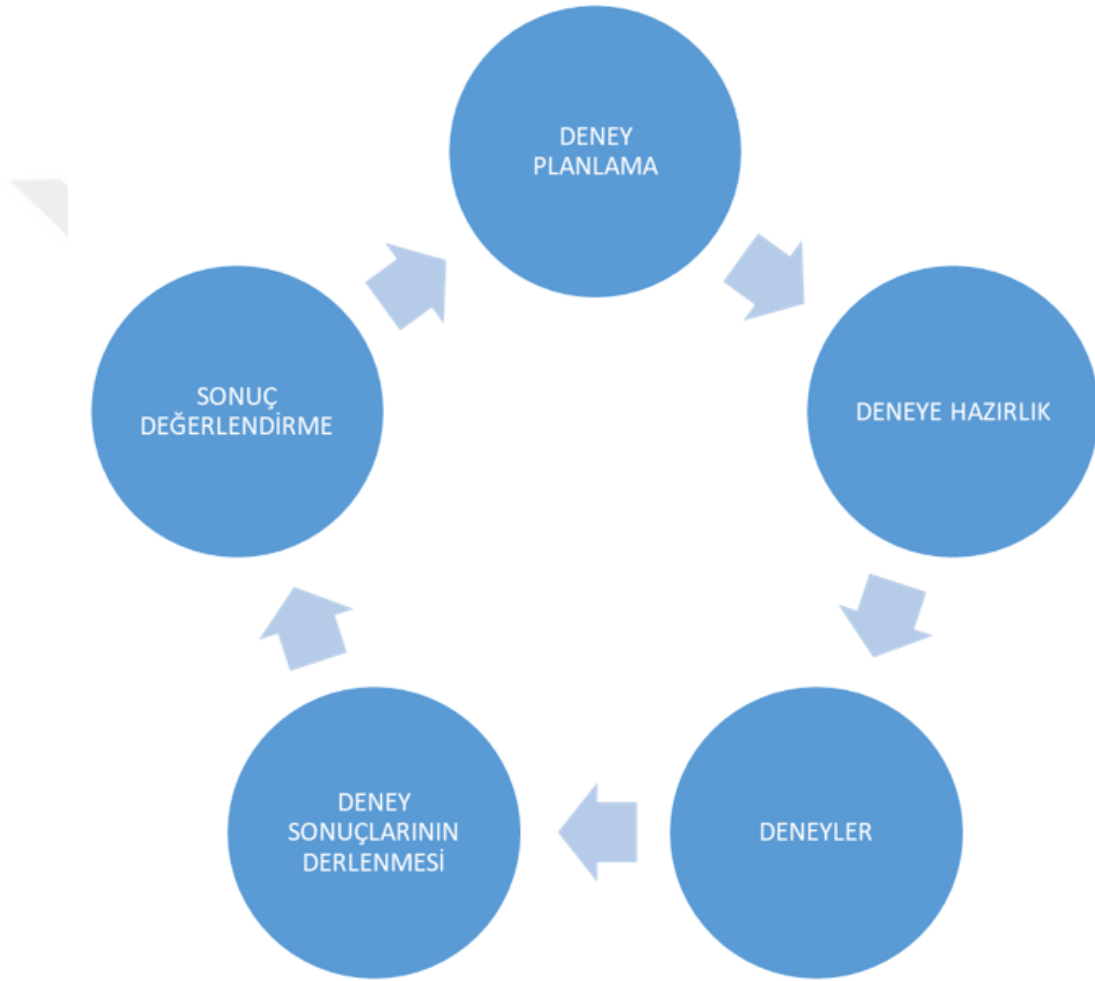
Yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen bulgulara dayanarak, SLS yöntemi ile PACF malzeme üretimi ile ilgili herhangi bir makaleye rastlanılmamıştır. İnternet taramalarında PACF malzeme ile endüstriyel alanda geliştirme çalışmalarının yapıldığı bilgisine ulaşılmıştır. PEKK malzeme Endüstriyel alanda genellikle PACF toz ile katmanlı üretimde üretim prosesi parametrelerinin optimizasyonu ve yeni üretim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yer almaktadır.

Endüstriyel alanda SLS için PEKK tozu üretimi yaygınca gerçekleştirilmekte fakat fiber katkılı PEKK tozu üretimi sınırlıdır. Buna bağlı olarak fiber katkılı PEKK tozlarının ticari alanda kullanımı oldukça azdır.

Web of science veritabanında 1975 ve 2019 yılları arasında yapılan literatür taramasında fiber katkılı Polimaid ile ilgili bir yayına rastlanmamıştır. Fiber katkılı Poliamid malzeme ile katmanlı imalat ile üretim sağlayan yayına rastlanılmamıştır.

## 2. YÖNTEM

Tez çalışmasına konu olan malzeme özelliklerinin çıkarılması Şekil 2.1’de gösterilen döngü ile çalışmalar gerçekleştirilmiş ve tamamlanmıştır.



Şekil 2.1 : Tez çalışmaları döngüsü

### 2.1 Deney Tasarımı ve Planı

Deney planı Çizelge 2.1’de verilmiştir. Buna göre toplamda 315 adet numune üretilmiş olup bu numunelerden 182’si test koşullarına uygun olmadığı veya ıskartaya düştüğü için değerlendirilen numune verileri içerisine alınmamıştır.

Toplamda 150 numune test edilmiş olup bu numunelerden 133 adedinden elde edilen veriler değerlendirmeye alınmıştır.

**Çizelge 2.1 : Deney planı**

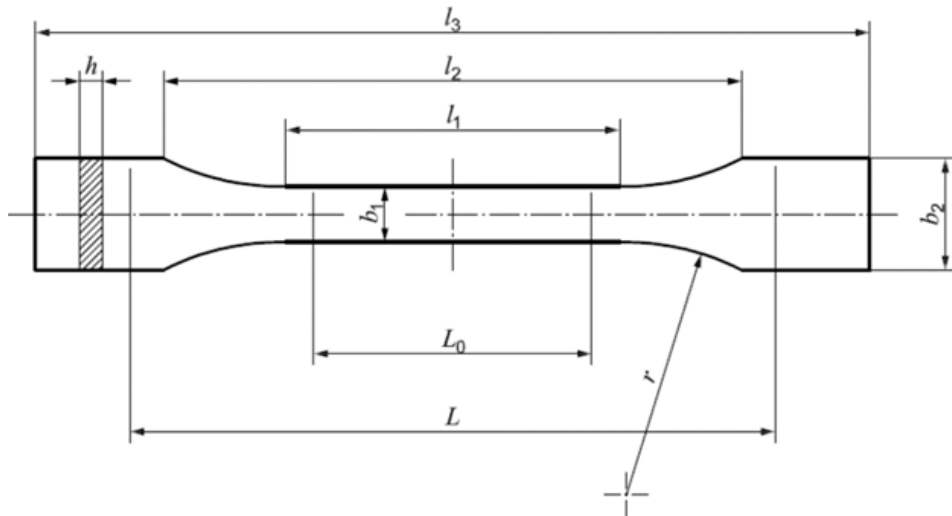
Test Tanımı	Standart	Malzeme Türü	Düzlem İçi Açı Sayısı	Düzlem Dışı Açı Sayısı	Numune Adedi	Toplam Üretilen Numune Sayısı	Değerlendirilen Numune Sayısı
Çekme Testi	ISO527-1, 2	PACF	3	7	5	105	68
Çekme Testi	ISO527-1, 2	PEKK	3	7	5	105	17
Basma Testi	ISO 604	PACF	3	7	5	105	48

PACF ve PEKK numuneleri için çekme deneyi ile akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma gerilmesi, Poisson oranı, elastisite modülü, uzama değerleri hesaplanmıştır.

PACF ve PEKK numuneleri için basma deneyi ile çekme gerilmesi, kopma gerilmesi ve uzama değerleri hesaplanmıştır.

## 2.2 Numune Tasarımı

Çekme deneyi numunesi tasarımı, ISO527-1, 2 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre Şekil 2.2'de belirtilen numunenin, Çizelge 2.2'de gösterilen ölçülere göre tasarlanarak Şekil 2.3'te gösterilen numune tasarımı elde edilmiştir.

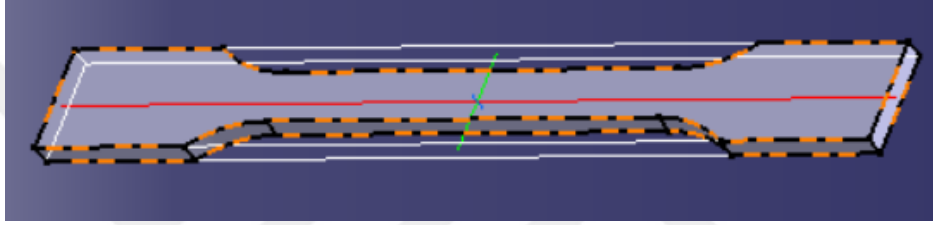


**Şekil 2.2 : Çekme test numunesi [18]**



**Çizelge 2.2 : Çekme test numuneleri ölçüleri [18]**

Tanım	Açıklama	Ölçü
$l_3$	Tüm uzunluk	170 mm
$l_1$	Dar paralel taraf parçaların uzunluğu	$80 \pm 2$ mm
$r$	Radyus	$24 \pm 1$ mm
$l_2$	Dar paralel taraf parçalar arası mesafe	$109,3 \pm 3,2$ mm
$b_2$	Uç genişliği	$20,0 \pm 0,2$ mm
$b_1$	Dar parça genişliği	$10,0 \pm 0,2$ mm
$h$	Tercih edilen kalınlık	$4,0 \pm 0,2$ mm
$L_0$	Ölçek uzunluğu	$75,0 \pm 0,5$ mm
$L$	Saplar arasındaki başlangıç mesafesi	$115 \pm 1$ mm

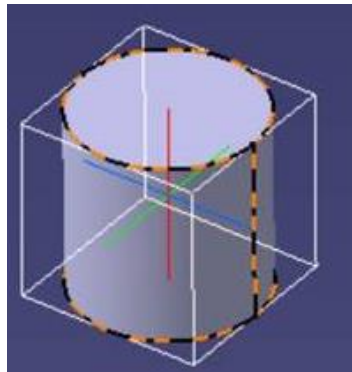


**Şekil 2.3 : CAD ile tasarlanmış çekme numunesi**

Basma Deneyi Numunesi Tasarımı, ISO 604 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre numune, Çizelge 2.3'te gösterilen ölçülere göre tasarlanarak Şekil 2.4'te gösterilen numune tasarımı elde edilmiştir.

**Çizelge 2.3 : Basma test numuneleri ölçüleri [19]**

Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$

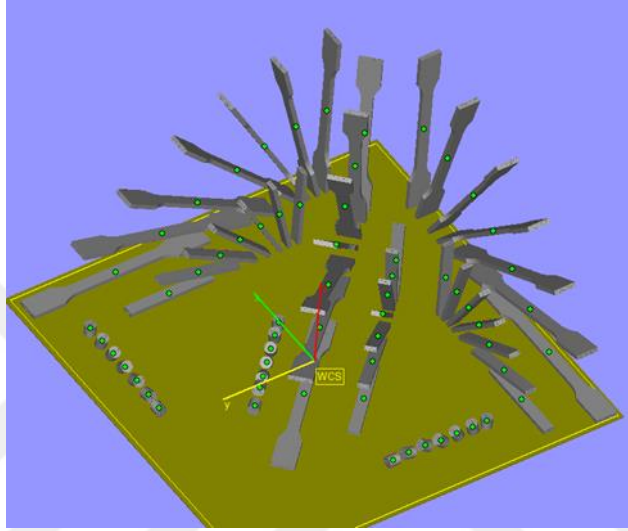


**Şekil 2.4: CAD ile tasarlanmış basma numunesi**

### 2.3 Numune Üretimi ve Proses Parametreleri

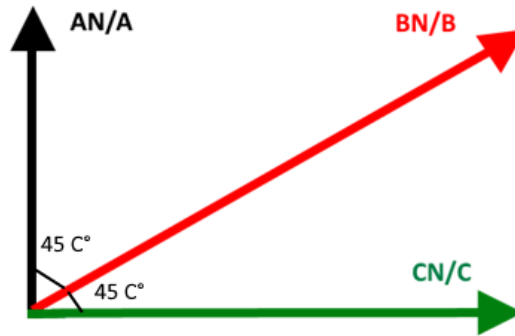
PACF ve PEKK numuneleri 15 m/s tarama hızına çıkabilen, 70 Watt lazer gücüne ve sırasıyla ortalama X:1.034, Y:1.034, Z:1000 DPI çözünürlüğüne sahip Ar-Ge amacıyla geliştirilmiş SLS cihazında üretilmiştir.

Numuneler, Şekil 2.5’de olduğu şekilde SLS makinası üretim tablasına göre bilgisayar ortamında yerleştirilmektedir. Numuneler bu konumda üretilmektedir.



Şekil 2.5: Üretim tablasına konumlandırılmış çekme ve basma numuneleri

Üretim tablasına üstten baktığımızda düzlem içi Y ekseninde uzanan numuneler AN, Z ekseninde uzanan numuneler BN, X ekseninde uzanan numuneler ise CN olarak referanslanmıştır. Üretim yönüne göre Y eksenindeki numuneler düzlem için  $0^\circ$ , Z eksenindeki numuneler düzlem için  $45^\circ$ , X eksenindeki numuneler düzlem için  $90^\circ$  olarak konumlandırılmış olarak refere edilmiştir. Şekil 2.6’da görsel ile açıklanmıştır. AN, BN, CN adı verilen seriler, numunelerin tabla üzerinde düzlem içi konumlandırılmasına göre tanımlanmıştır.



Şekil 2.6 : Üretim tablasına üstten bakışa göre numune sınıflandırma

PACF çekme ve basma numunesi olarak endüstride kullanılan PA-802-CF malzemesinden üretilmiş numuneler kullanılmıştır. PACF üretim parametreleri aşağıdaki Çizelge 2.4 verilmiştir.

**Çizelge 2.4 : PACF çekme ve basma numunesi üretim parametreleri**

Parametreler	Değerler
Katman Kalınlığı	120 µm
İnert Gaz Türü	Nitrojen
Lazer Gücü	50 W
Toz Yatak Sıcaklığı	184°
Tarama Hızı	500 in/s
Lazer Nokta/İz Genişliği	450 µm
Tarama Aralığı (SCSP)	0,1 mm
Ortalama Toz Boyutu	50 µm
Toz Boyut Aralığı	30-78 µm
Proses Sıcaklığı	196°

PEKK çekme numunesi olarak endüstride kullanılan PEKK6002 malzemesinden üretilmiş numuneler kullanılmıştır. PEKK çekme numunesi üretim parametreleri aşağıdaki Çizelge 2.5 verilmiştir.

**Çizelge 2.5 : PEKK çekme numunesi üretim parametreleri**

Parametreler	Değerler
Katman Kalınlığı	80 µm
İnert Gaz Türü	Nitrojen
Lazer Gücü	32-45 W
Toz Yatak Sıcaklığı	170-200°
Tarama Hızı	500 in/s
Lazer Nokta/İz Genişliği	450 µm
Tarama Aralığı (SCSP)	0,1 mm
Ortalama Toz Boyutu	60 µm
Toz Boyut Aralığı	30-90 µm
Proses Sıcaklığı	305-320°

Üretilen çekme numunelerine, nihai işlem olarak kumlama operasyonu yapılmaktadır. Böylece yüzey pürüzlülüğü etkisi azaltılmıştır. Kumlama yapılan numuneler birbirinden talaşlı imalat veya manuel olarak kesici alet yardımı ile ayrılmaktadır.

## 2.4 Çekme Deneyi

Çekme deneyi için tüm numuneler ekstansometre ile veri alabilmek amacıyla uygun olarak işaretlenerek deney sırasına göre hazırlanmıştır. Şekil 2.7’de PACF çekme numunelerinin çekme deneyi için hazırlığı gösterilmiştir. Numuneler ekstansometre ölçümü için standart olarak belirlenen ölçülere göre işaretlenmiş ve numune referans numarasına göre yerleştirilmiştir. Şekil 2.8’de ise çekme deneyi için hazırlanmış PEKK çekme numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Çekme deneyine hazırlanmış PACF numuneleri



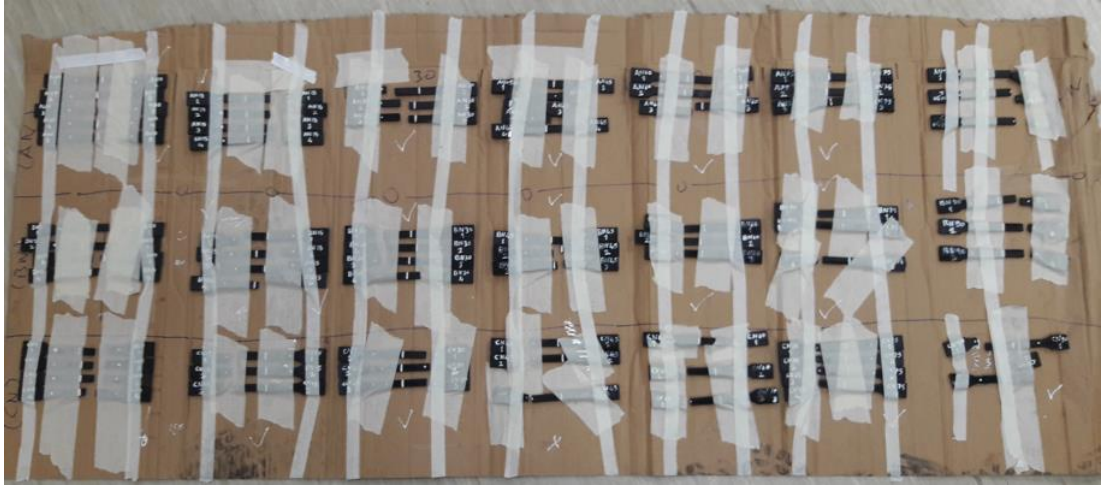
Şekil 2.8 : Çekme deneyine hazırlanmış PEKK numuneleri

Hazırlanan numuneler, ekstansometre görüş alanına ve kamera düzeneğine göre çekme cihazında konumlandırılmaktadır. Şekil 2.9'da gösterilen SHİMADZU servohidrolik 250 kN test cihazında test edilmiştir.



Şekil 2.9 : Çekme deneyi

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi çekme deneyi tamamlanan numuneler, sonraki incelemeler için hazır hale getirilmiştir.

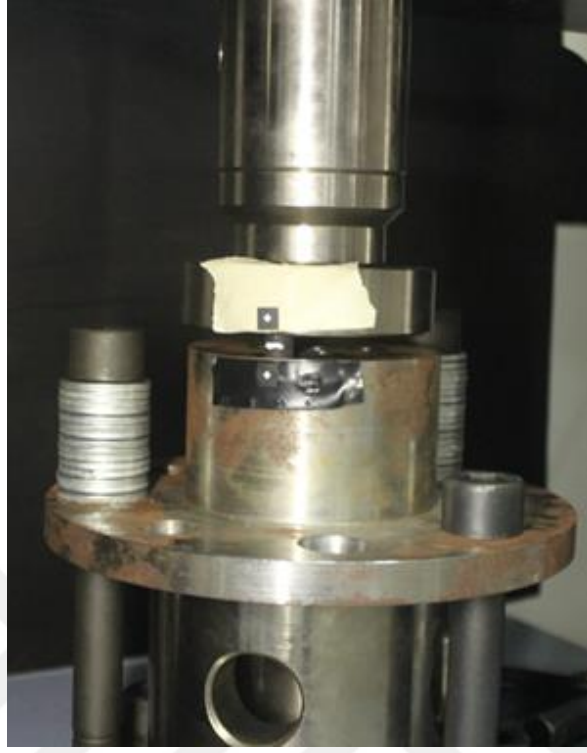


Şekil 2.10 : Çekme deneyi tamamlanmış numuneler

## 2.5 Basma Deneyi

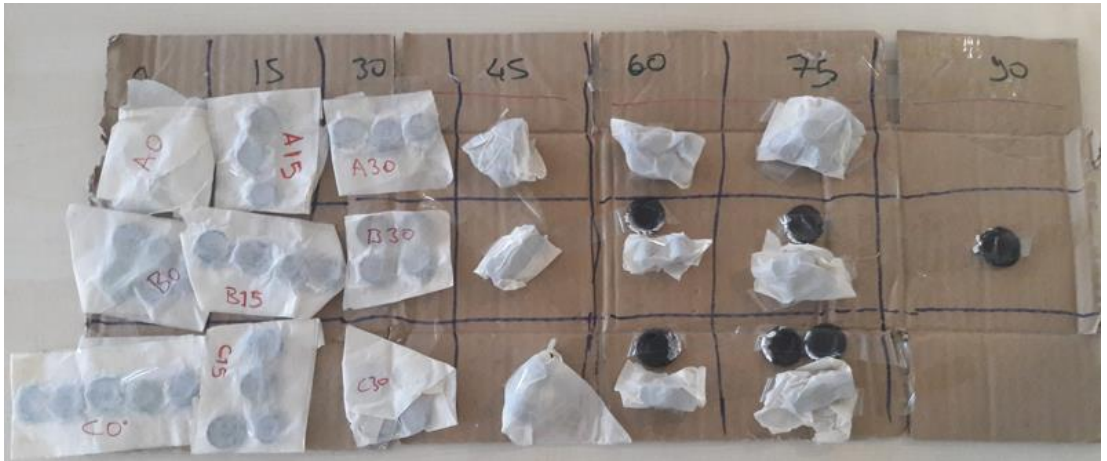
Basma deneyi için hazırlanan numuneler, ekstansometre görüş alanına ve kamera düzeneğine göre çekme cihazında konumlandırılmaktadır. Numune boyutları küçük olması ve ekstansometre görüş alanını yakalayabilmek için numune altına ilave aparat

yerleştirilmiştir. Basma deneyi, SHİMADZU servohidrolik 250 kN test cihazında test cihazında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.11 : Basma deneyi**

Şekil 2.11’de gösterildiği gibi basma numuneleri ilave bir aparat yardımı ile test cihazında konumlandırılmıştır. Basma deneyi tamamlanan numuneler sonraki incelemeler için Şekil 2.12’de gösterildiği gibi hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 2.12 : Basma deneyi tamamlanmış numuneler**

### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Tez çalışmasına konu olan malzeme özelliklerinin çıkarılması Şekil 2.1’de gösterilen döngü ile çalışmalar gerçekleştirilmiş Tez çalışmaları kapsamında elde edilen sonuçlar ve sonuçlara istinaden değerlendirilmeler bu bölümde sunulmaktadır. Malzemelerin SLS ile üretiminde düzlem içi ve düzlem dışı konumlandırmaya göre olan davranışlarının tespiti ve kıyaslanması amacıyla tüm deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler karşılaştırmalı olarak paylaşılmış ve değerlendirmeleri yapılmıştır.

#### **3.1 Malzeme Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi**

##### **3.1.1 PACF çekme sonuçlarının değerlendirilmesi**

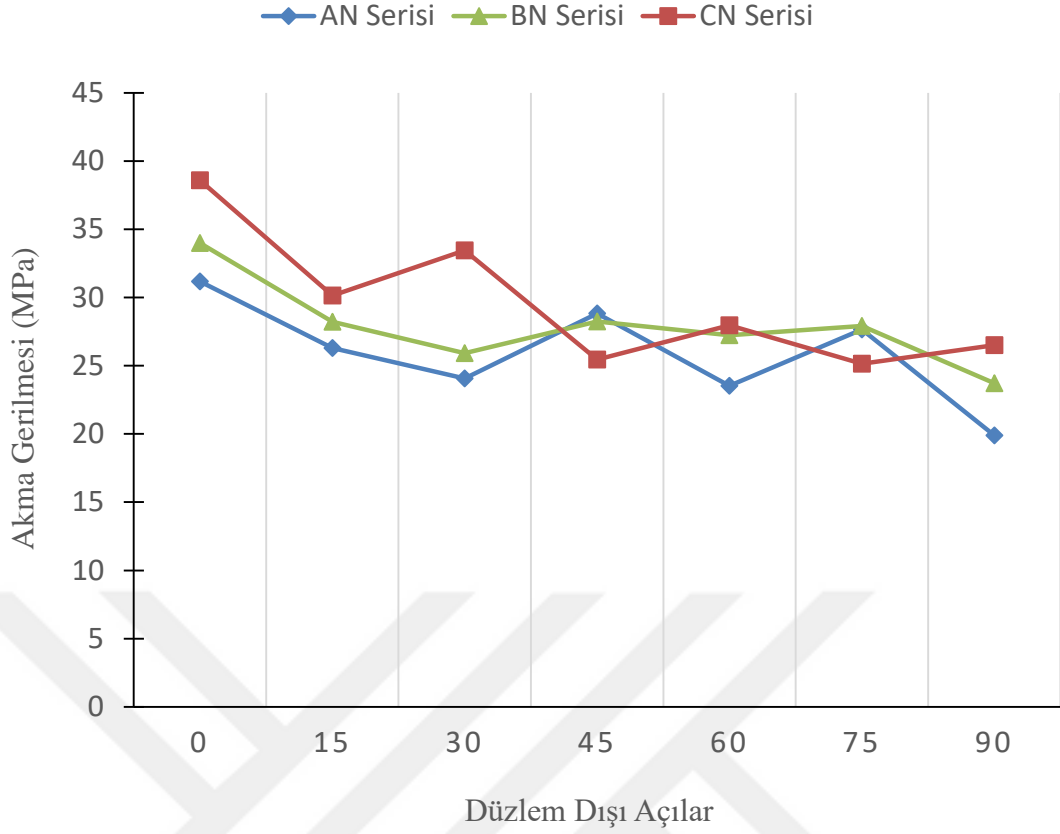
PACF malzemenin çekme deneyi sonuçlarından elde edilen akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma gerilmesi, Poission oranı, elastisite modülü, % uzama değerleri değerlendirilmiştir.

##### **3.1.1.1 Akma gerilmesi**

Şekil 3.1 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açıların akma gerilmesine %38’e varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark, düzlem dışı “0” ile düzlem dışı “90” arasında olduğu görülmektedir.

Düzlem dışı açıların etkisi en fazla CN serisinde ortaya çıkmaktadır. Düzlem dışı konumlandırmaya yani serilere bakılarak 0° ile 90° arasındaki en büyük farkın CN serisinde olduğu görülmektedir. BN ve AN serilerine bakıldığında düzlem dışı konumlandırmanın akma gerilmesine etkisinin oldukça az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı “0” numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı “90” numunelerinin verdiği söylenebilir. Ayrıca düzlem dışında 0°’den 90°’ye giderken genel olarak akma gerilmesi değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir.



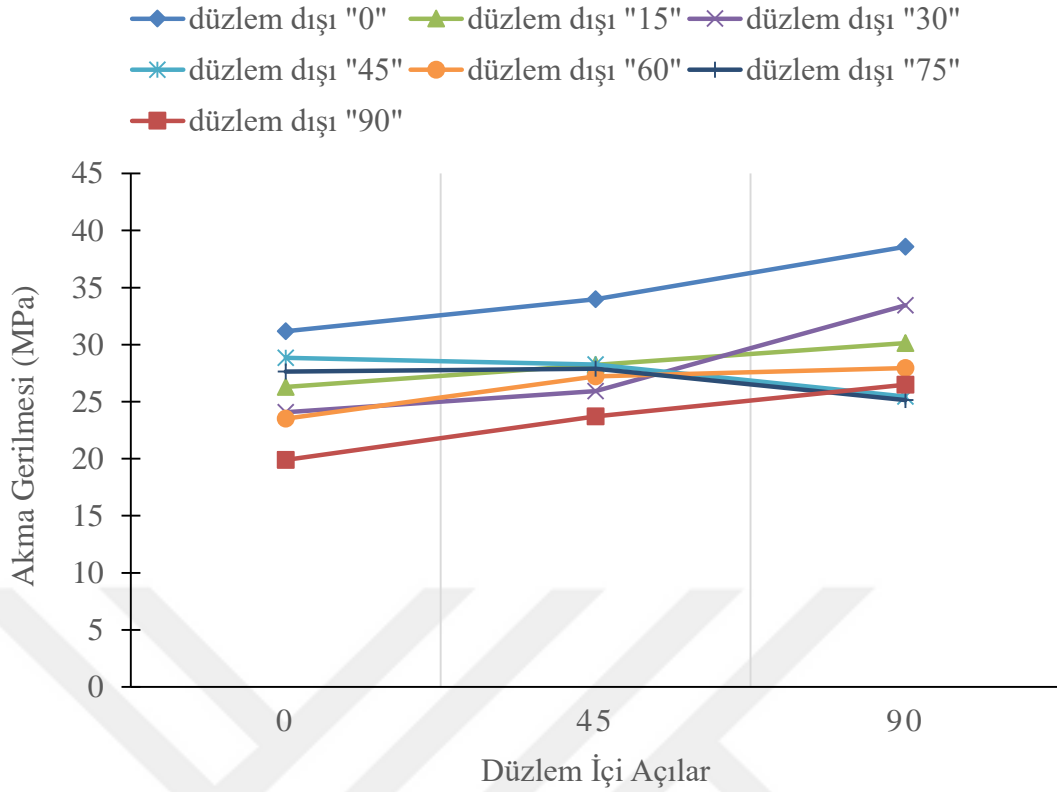
**Şekil 3.1 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) akma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması

Şekil 3.2 değerlendirildiğinde, düzlem içi açılarının akma gerilmesine %42'ye varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken akma gerilmesinde artış olduğu gözlenmektedir. Ancak AN serisinde 45° ve 75° düzlem dışı açılarda meydana gelen sapmanın üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

CN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %59'a varan değişimler, BN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %43'e varan değişimler ve AN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde ise %53'e varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "90" numunelerinin verdiği görülmektedir.





**Şekil 3.2 :** Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri akma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

### 3.1.1.2 Çekme gerilmesi

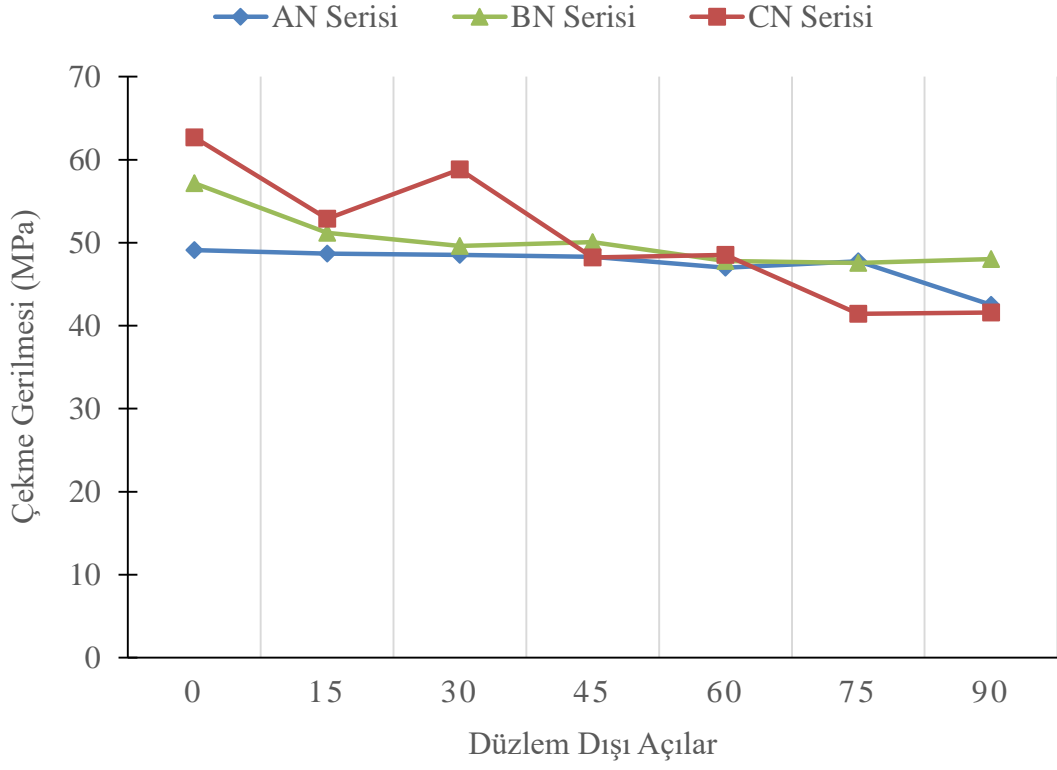
Şekil 3.3 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açıların çekme gerilmesine %33'e varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark düzlem dışı "0" ile düzlem dışı "90" arasında olduğu görülmektedir.

Düzlem dışı açılar etkisi en fazla CN serisinde ortaya çıkmaktadır. Düzlem dışı konumlandırmaya yani serilere bakılarak 0° ile 90° arasındaki en büyük farkın CN serisinde olduğu görülmektedir. BN ve AN serilerine bakıldığında, düzlem dışı konumlandırmanın çekme gerilmesine etkisinin oldukça az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "90" numunelerinin verdiği söylenebilir. Ayrıca düzlem dışında, 0°'den 90°'ye giderken genel olarak çekme değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 3.4 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların çekme gerilmesine %31'e varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken çekme gerilmesinde artış olduğu gözlenmektedir. Ancak AN serisinde 45°,

75° ve 90° düzlem dışı açılarda meydana gelen sapmanın üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 3.3 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) çekme gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması

CN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %13'e varan değişimler, BN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %20'ye varan değişimler ve AN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde ise %50'ye varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri, düzlem dışı "0" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "90" numunelerinin verdiği görülmektedir.

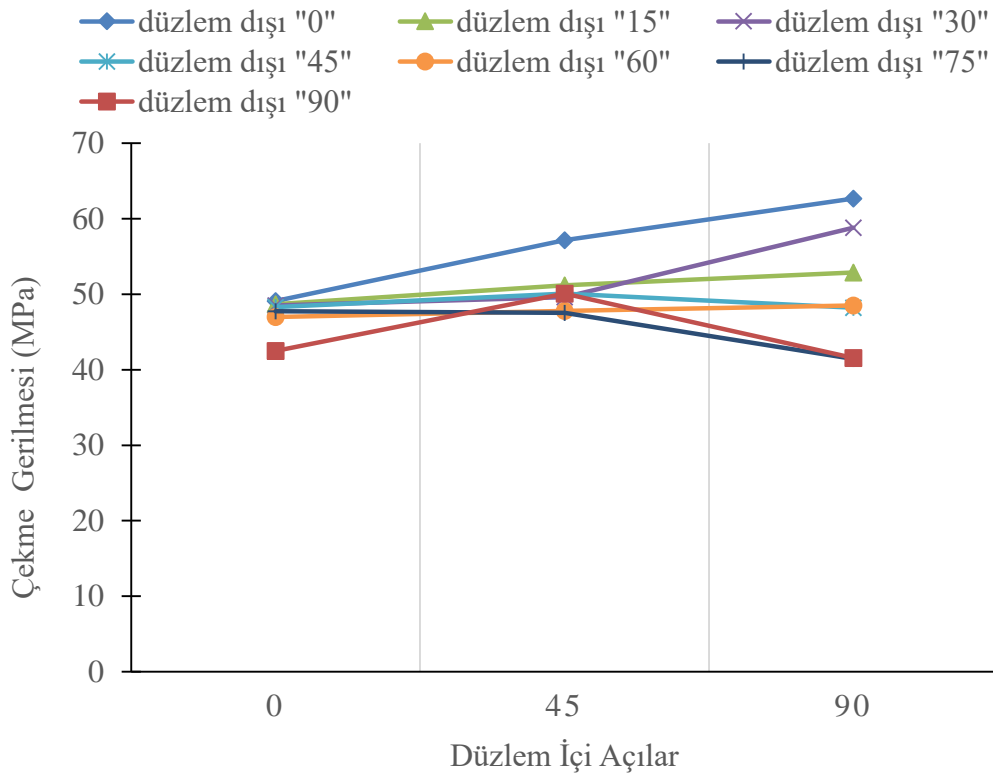
### 3.1.1.3 Kopma gerilmesi

Şekil 3.5 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açılarının kopma gerilmesine %46'ya varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark düzlem dışı "0" ile düzlem dışı "90" arasında olduğu görülmektedir.

Düzlem dışı açılar etkisi en fazla CN serisinde ortaya çıkmaktadır. Düzlem dışı konumlandırmaya yani serilere bakılarak 0° ile 90° arasındaki en büyük farkın CN

serisinde olduğu görülmektedir. BN ve AN serilerine bakıldığında düzlem dışı konumlandırmanın kopma gerilmesine etkisinin oldukça az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri, düzlem dışı "0" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "90" numunelerinin verdiği söylenebilir. Ayrıca düzlem dışında 0°'den 90°'ye giderken genel olarak kopma değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir.

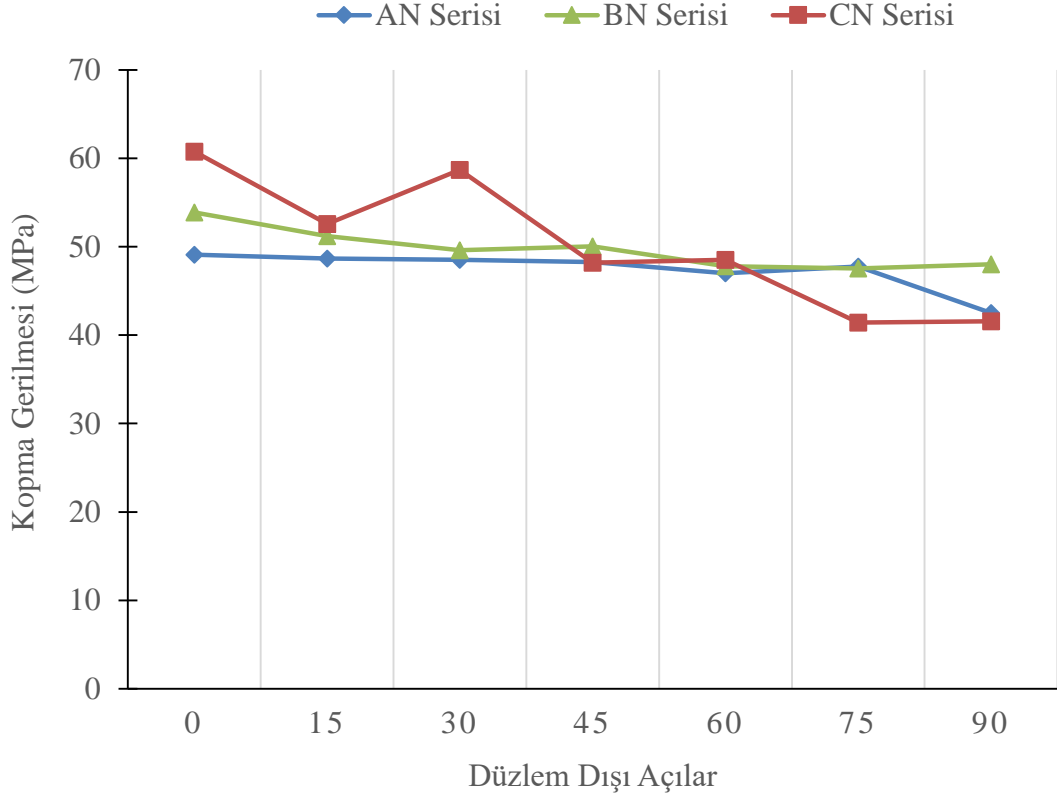


**Şekil 3.4 :** Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri çekme gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

Şekil 3.6 değerlendirildiğinde düzlem içi açılarının kopma gerilmesine %27'ye varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken kopma gerilmesinde artış olduğu gözlenmektedir. Ancak AN serisinde 45°, 75° ve 90° düzlem dışı açılarda meydana gelen sapmanın üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

CN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %13'e varan değişimler, BN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %12'ye varan değişimler ve AN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde ise %46'ya varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri, düzlem dışı “0” numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı “90” numunelerinin verdiği görülmektedir.



**Şekil 3.5 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) kopma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması

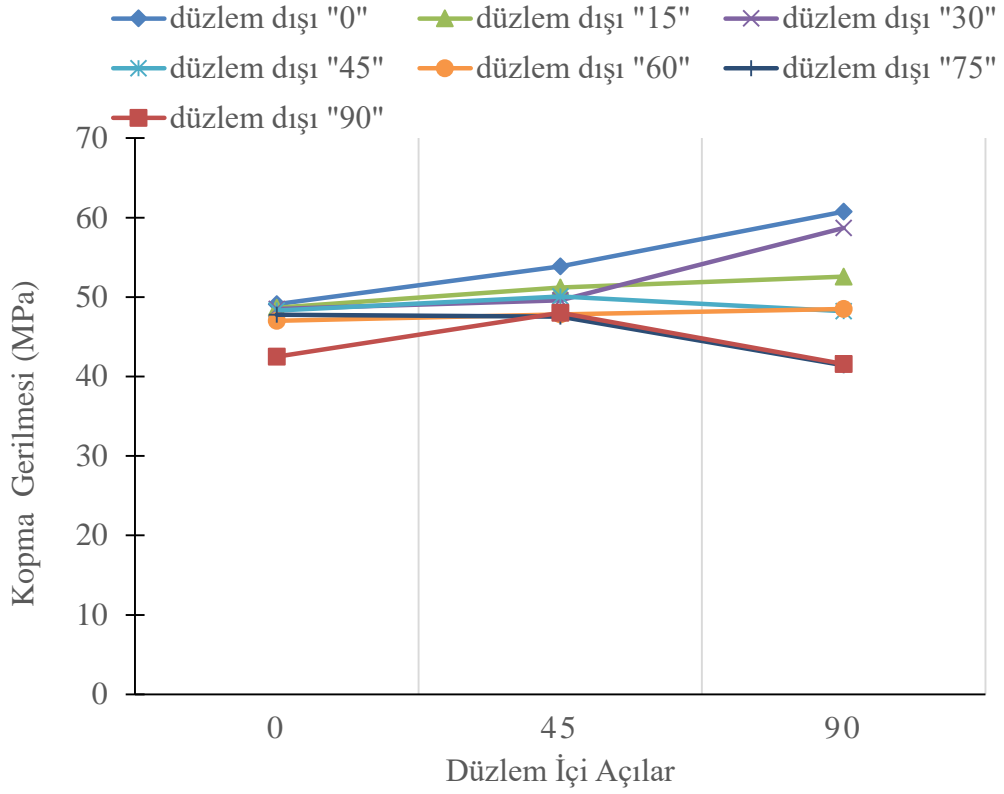
### 3.1.1.4 Poisson oranı

Şekil 3.7 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açılarının poisson oranına %46’ya varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark düzlem dışı “0” ile düzlem dışı “90” arasında olduğu görülmektedir.

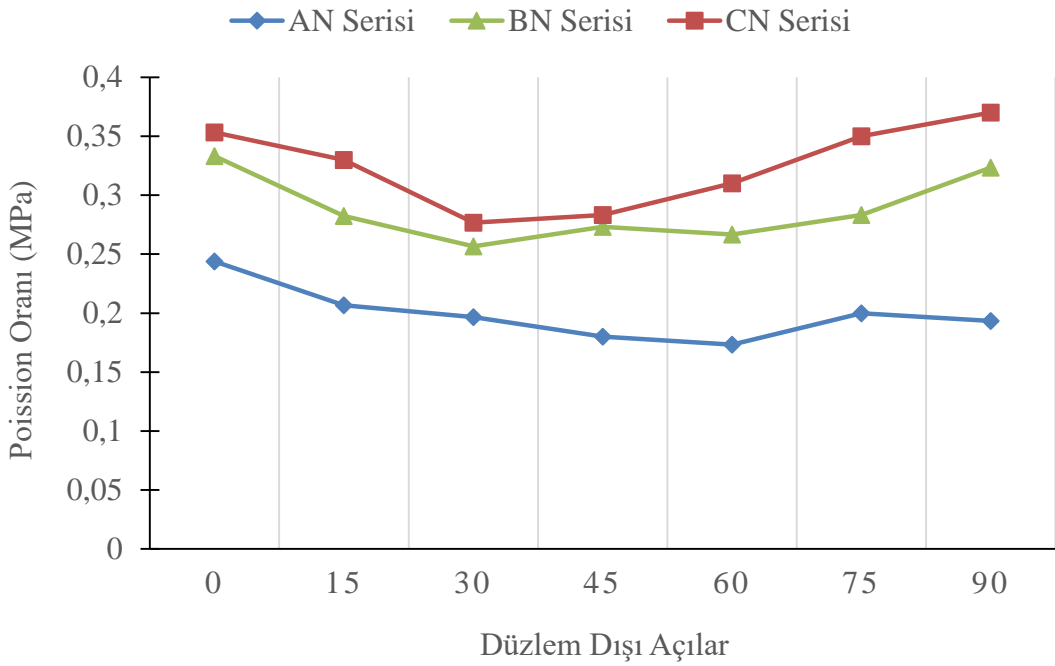
Düzlem dışı açılarının etkisi en fazla CN serisinde ortaya çıkmaktadır. Düzlem dışı konumlandırmaya yani serilere bakılarak, 0° ile 90° arasındaki en büyük farkın CN serisinde olduğu görülmektedir. BN ve AN serilerine bakıldığında, düzlem dışı konumlandırmanın kopma gerilmesine etkisinin daha az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri genellikle düzlem dışı “0” numuneleri vermektedir. Akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma gerilmesinden elde edilen bulgulardan farklı olarak poisson oranı değerlerinde düzlem dışında 0°’den

45°'ye giderken genel olarak düşüş, 60°'den 90°'ye giderken ise genel bir artış görülmektedir.



**Şekil 3.6 :** Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri kopma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması



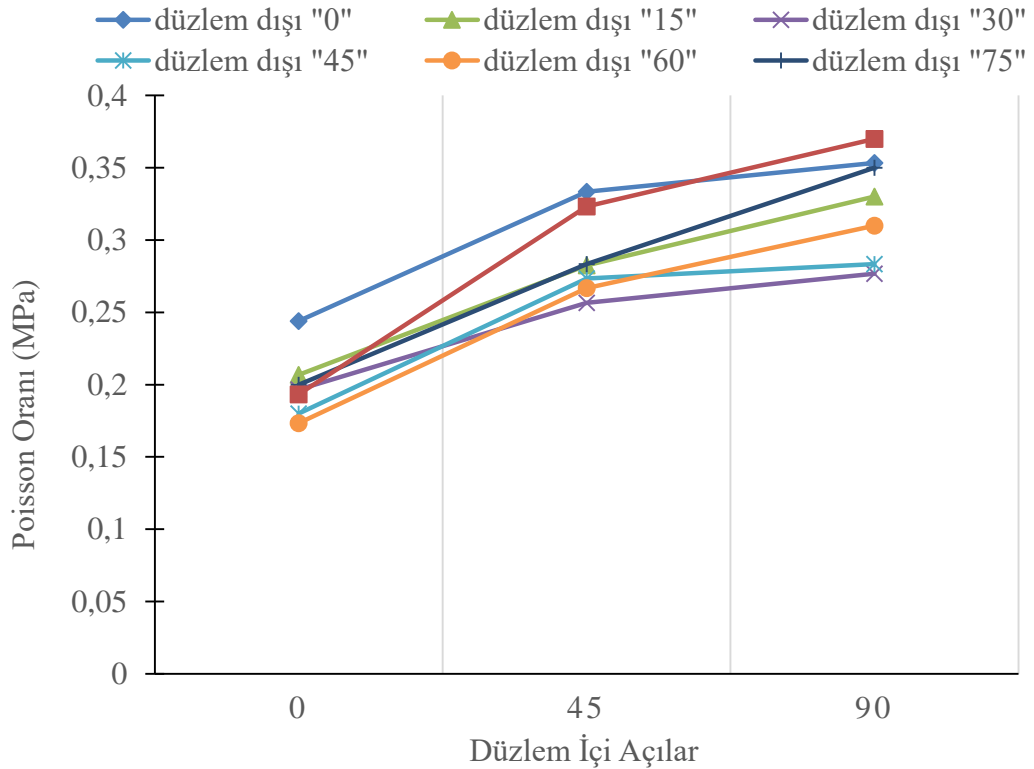
**Şekil 3.7 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) poisson oranı değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması

Şekil 3.8 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların poisson oranına %57'ye varan etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken kopma gerilmesinde artış olduğu gözlenmektedir.

CN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %41'e varan değişimler, BN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %32'ye varan değişimler ve AN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde ise %34'e varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" ve düzlem dışı "90" numuneleri vermektedir.

Düzlem içi konumlandırmada elde edilen ortalama poisson oranı değerlerini CN serisi içerisinde maksimum 0,07, BN serisi içerisinde maksimum 0,07, AN serisi içerisinde maksimum 0,12 değerlerinde değişiklik göstermektedir. CN serisindeki numunelerin poisson oranı arasındaki farkın diğer serilere göre yüksek olduğu aşikardır.



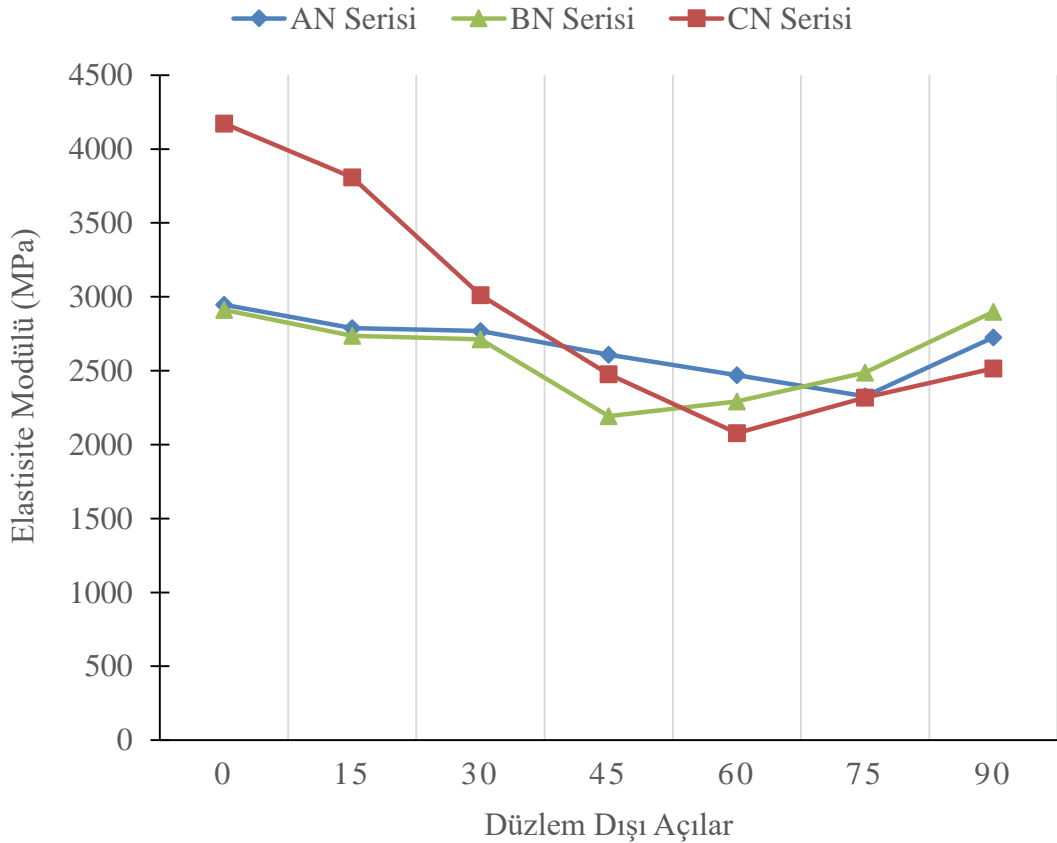
**Şekil 3.8 :** Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri poisson oranı değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

### 3.1.1.5 Elastisite modülü

Şekil 3.9 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açıların elastisite modülüne %100'e varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark düzlem dışı "0" ile düzlem dışı "90" arasında olduğu görülmektedir.

Düzlem dışı açılar etkisi en fazla CN serisinde ortaya çıkmaktadır. Düzlem dışı konumlandırmaya yani serilere bakılarak 0° ile 90° arasındaki en büyük farkın CN serisinde olduğu görülmektedir. BN ve AN serilerine bakıldığında düzlem dışı konumlandırmanın elastisite modülüne etkisinin daha az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değerleri ise düzlem dışı "45" ve "60" numunelerinin verdiği söylenebilir. Ayrıca düzlem dışında 0°'den 60°'ye giderken genel olarak elastisite modülü değerlerinde genel bir düşüş olduğu, 60°'den 90°'ye giderken ise genel olarak bir yükseliş görülmektedir.

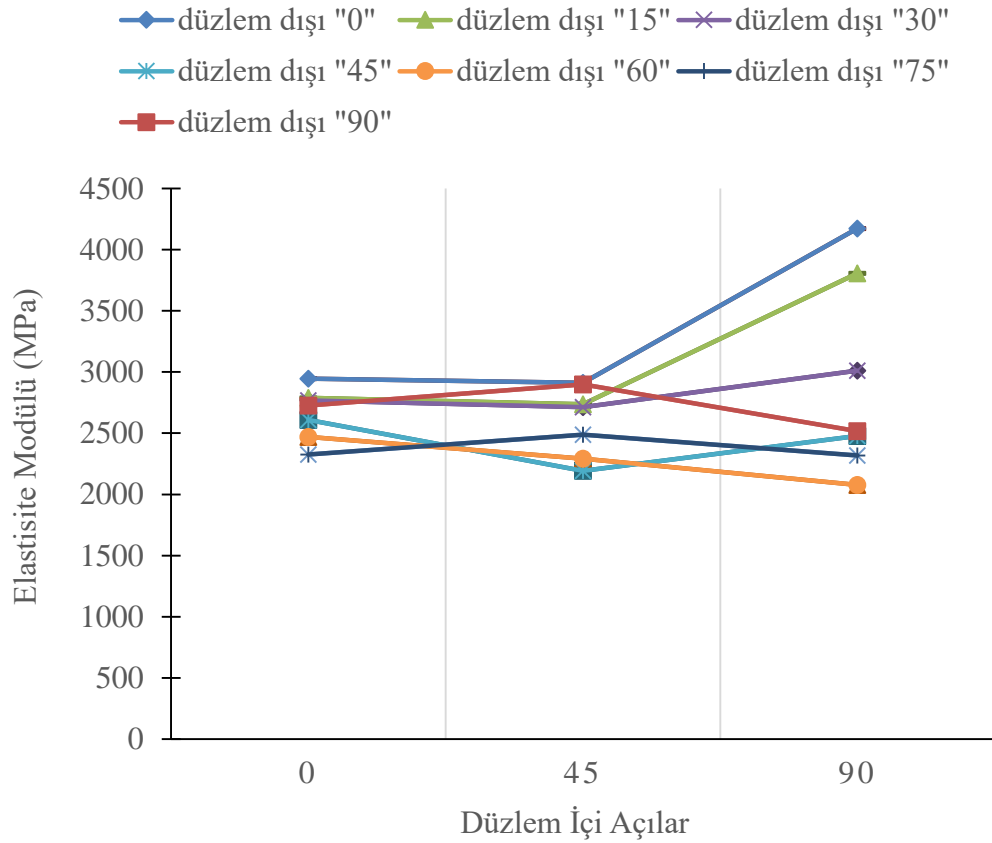


**Şekil 3.9 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) elastisite modülü değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması

Şekil 3.10 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların elastisite modülüne %41'e varan etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Düzlem içi 0°'den 45°'ye giderken genel olarak değişim gözlenmektedir. Düzlem içi 45°'den 90°'ye giderken ise düzlem dışı "0", "15", "30" ve "45" açı değerlerinde elastisite modülünde yükseliş, düzlem dışı "60", "75" ve "90" değerlerinde bir düşüş gözlenmektedir.

CN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %100'ya varan değişimler, BN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %26'ya varan değişimler ve AN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde ise %26'ya varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırılmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" ve düzlem dışı "15" numuneleri vermektedir.



**Şekil 3.10** : Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri elastisite modülü değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması



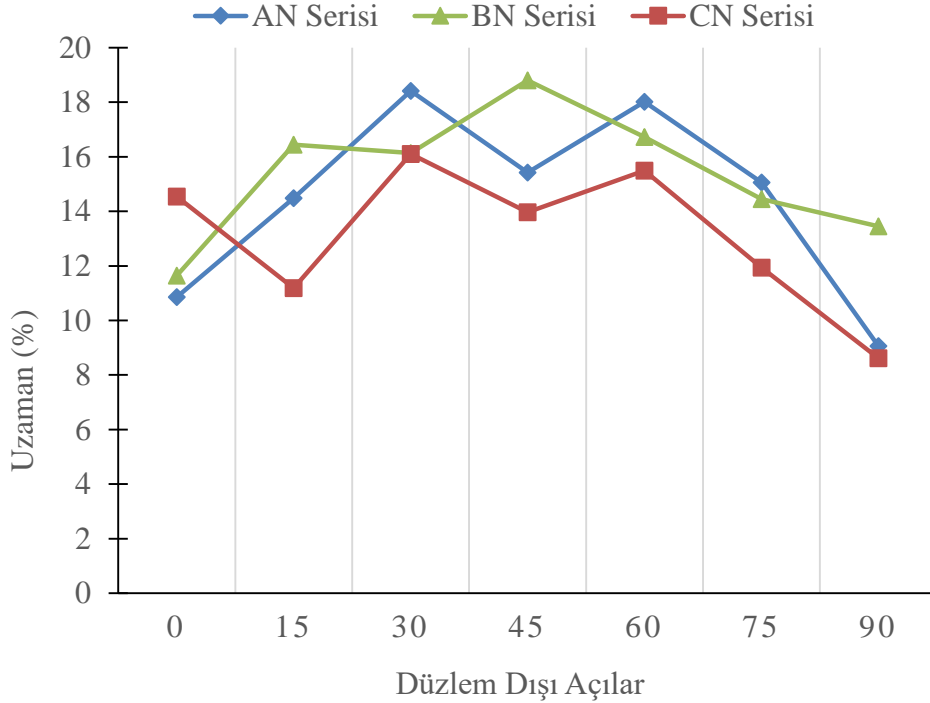
### 3.1.1.6 Uzama

Şekil 3.11 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açıların uzama'ya %100'e varan etkisinin olduğu görülmektedir. Düzlem dışı açıların etkisi tüm serilerde ortaya çıkmaktadır. CN serisinin uzama değerleri diğer serilerden daha düşüktür.

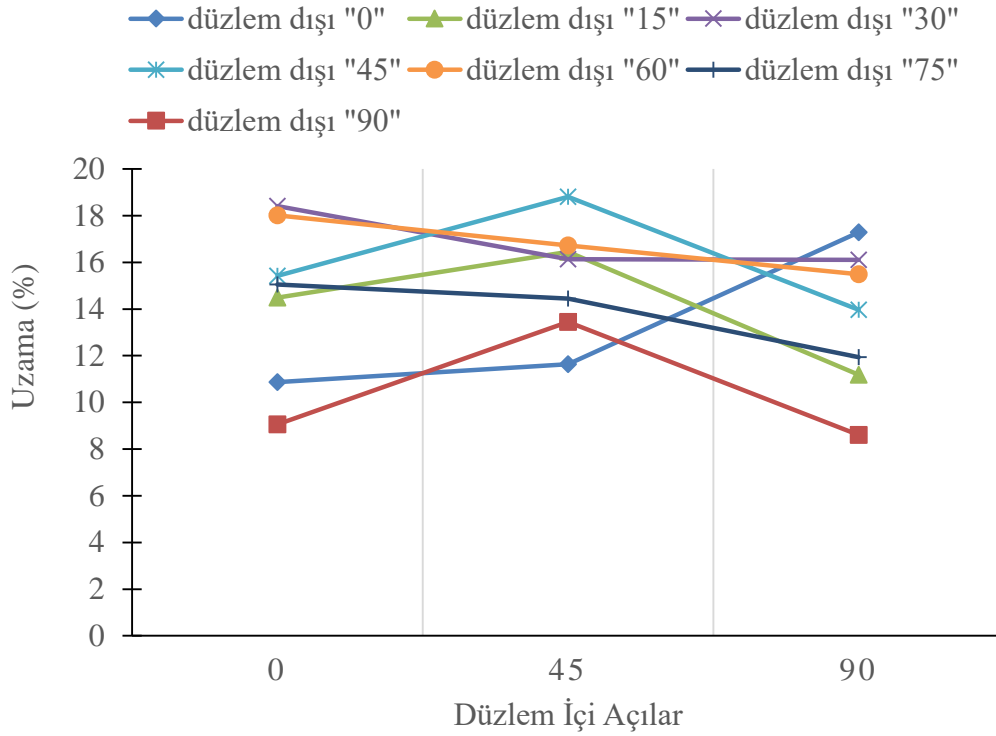
Düzlem dışı konumlandırmada en düşük değerleri düzlem dışı "0" ve "90" numuneleri bariz olarak vermektedir. En yüksek değerleri ise düzlem dışı "30" ve "60" numunelerinin verdiği söylenebilir.

Şekil 3.12 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların uzamaya %70'e varan etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Düzlem içi 0°'den 45°'ye giderken genel bariz bir değişim gözlenmemektedir. Düzlem içi 45°'den 90°'ye giderken ise uzama değerlerinde bir miktar düşüş görülmektedir.

CN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %100'e varan değişimler, BN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde %61'e varan değişimler ve AN serisinden elde edilen çekme gerilmesi değerlerinde ise %100'e varan değişimler gözlenmiştir.



**Şekil 3.11** : Düzlem içi konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri (Seriler) uzama değerlerinin düzlem dışı açılara göre kıyaslaması



**Şekil 3.12 :** Düzlem dışı konumlandırılmış PACF çekme deneyi numuneleri uzama değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

### 3.1.2 PACF basma sonuçlarının değerlendirilmesi

Tüm seriler için  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  düzlem dışı konumlarda üretilen numuneler değerlendirilmiştir. Yalnızca BN ve CN serileri için ise  $60^\circ$  ve  $75^\circ$ 'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen değerler çizelgelerde verilmiştir.

AN serisinden düzlem dışı  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  açılarda ve BN ile CN serisinden düzlem dışı  $45^\circ$  açıda üretilmiş numuneler standarda uygun olmadığı için değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Şekil 3.13'te standarda uygun olmayacak şekilde üretim tablasına göre eğik üretilmiş numuneler gösterilmiştir.



**Şekil 3.13 :** Standarda uygun üretilmemiş PACF basma numuneleri

### 3.1.2.1 Akma gerilmesi

Şekil 3.14 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açıların akma gerilmesine %9'a varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek fark düzlem dışı "30" ile düzlem dışı "90" arasında olduğu görülmektedir. Tüm serilere bakıldığında düzlem dışı konumlandırmanın basma testine göre akma gerilmesine etkisinin oldukça az olduğu ortaya çıkmaktadır.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "90" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "30" numunelerinin verdiği görülmektedir. Ayrıca düzlem dışında 0°'den 30°'ye giderken genel olarak akma gerilmesi değerlerinde bir düşüş, 30°'den 90°'ye giderken akma gerilmesi değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.

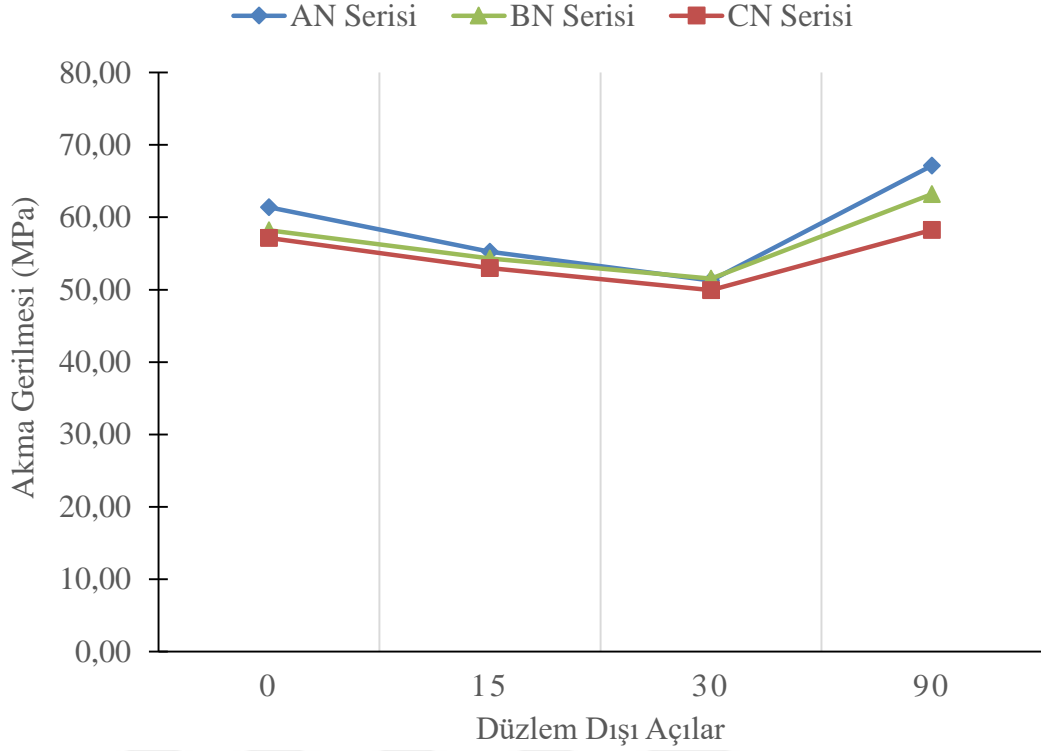
Şekil 3.15 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların akma gerilmesine %15'e varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken akma gerilmesinde azalma gözlenmektedir.

CN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %17'ye varan değişimler, BN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %22'ye varan değişimler ve AN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde ise %16'ya varan değişimler gözlenmiştir.

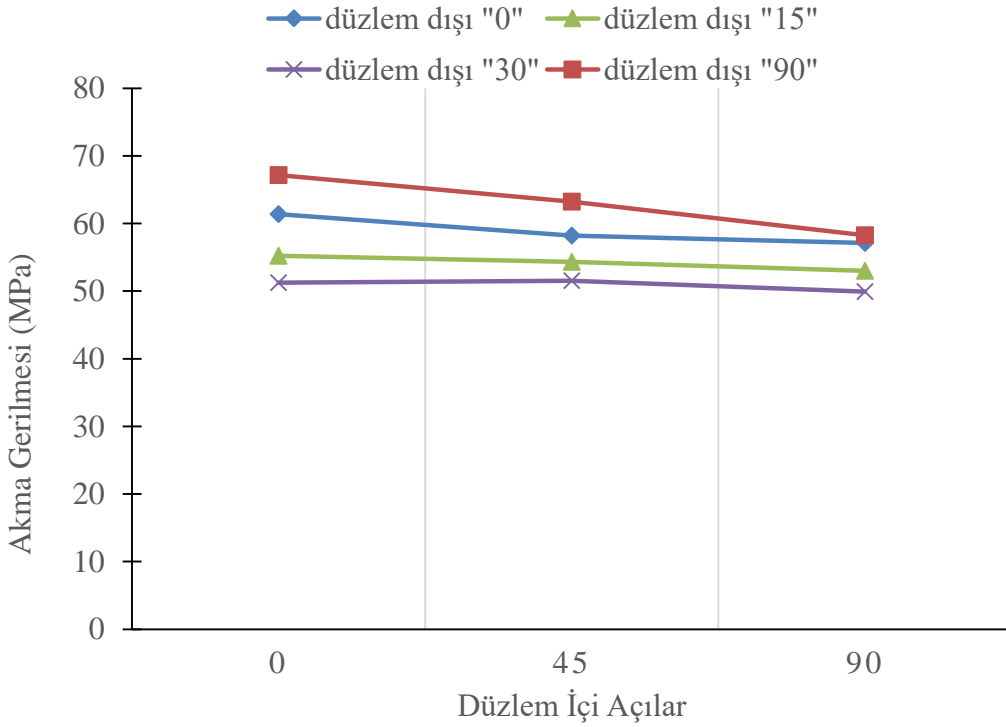
Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "90" numuneleri bariz olarak vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "30" numunelerinin verdiği görülmektedir.

Yalnızca BN ve CN serileri için ise 60° ve 75°'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen akma gerilmesi değerleri çizelge 3.1'de verilmiştir.

Yalnızca BN ve CN serileri için ise 60° ve 75°'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri çizelge 3.2'de verilmiştir. BN ve CN serisinde düzlem dışı "60" ve düzlem dışı "70" numunelerinden elde edilen değerler arasında %3 ila 4 arasında çok düşük fark bulunmaktadır. Ayrıca bu numuneler tüm değerler içerisinde orta seviyededir.



**Şekil 3.14 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) akma gerilmesi değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması



**Şekil 3.15 :** Düzlem dışı 0°, 15°, 30°, 90° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri akma gerilmesi değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

**Çizelge 3.1 :** BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri akma gerilmesi değerleri

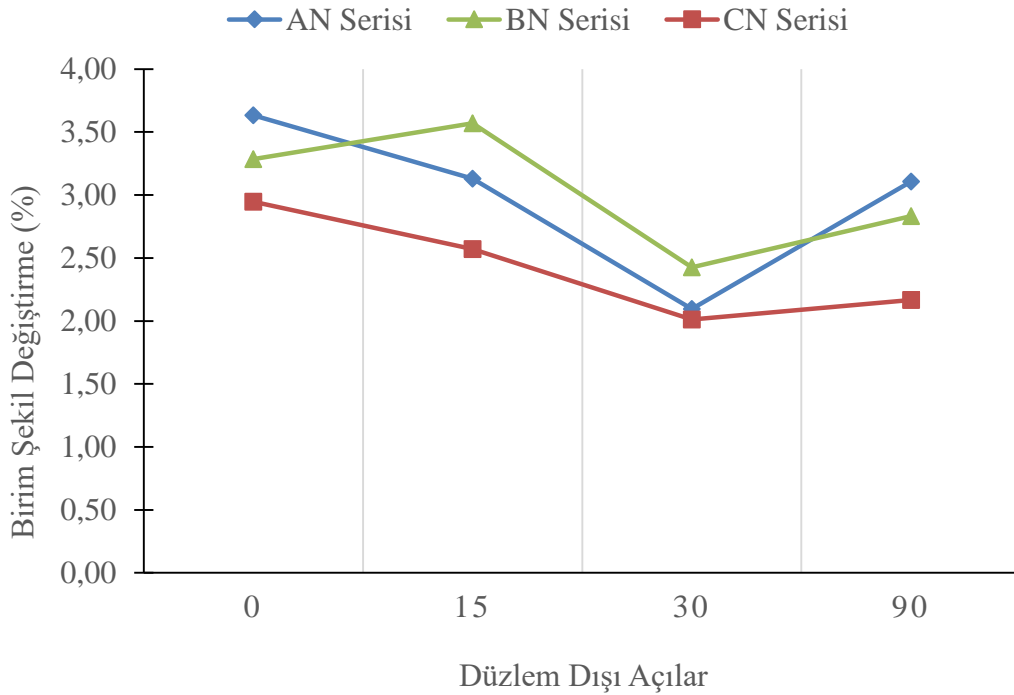
Seri Adı (düzlem içi)	60° düzlem dışı (MPa)	75° düzlem dışı (MPa)
BN Serisi	56,52	60,09
CN Serisi	59,08	58,25

### 3.1.2.2 Birim şekil değiştirme

Tüm seriler için 0°, 15°, 30° ve 90° düzlem dışı konumlarda üretilen numuneler değerlendirilmiştir.

Şekil 3.16 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açılarda birim şekil değiştirmeye %72'ye varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek birim şekil değiştirme farkı düzlem dışı “30” ile düzlem dışı “0” numunelerinden elde edilen değerlerin arasında olduğu görülmektedir.

Ayrıca düzlem dışında 0°’den 30°’ye giderken genel olarak birim şekil değiştirme değerlerinde bir düşüş olduğu, 30°’den 90°’ye giderken ise bir artış olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.16 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) birim şekil değiştirme değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması

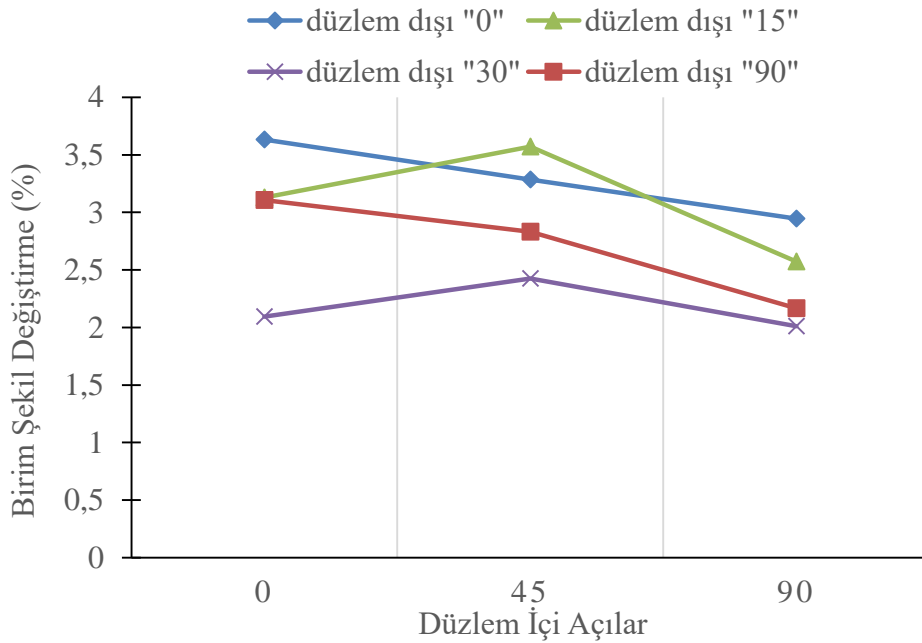
Şekil 3.17 değerlendirildiğinde, düzlem içi açıların akma gerilmesine %43'ye varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye giderken birim şekil değiştirme oranında azalma olduğu gözlenmektedir. Ancak BN serisinde 15° düzlem dışı açıda meydana gelen sapmanın üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

CN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %72'ye varan değişimler, BN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %46'ya varan değişimler ve AN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde ise %46'ya varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "0" numuneleri vermektedir. En düşük değeri ise düzlem dışı "30" numunelerinin verdiği görülmektedir.

Yalnızca BN ve CN serileri için ise 60° ve 75°'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri çizelge 3.2'de verilmiştir.

Yalnızca BN ve CN serileri için ise 60° ve 75°'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri çizelge 3.2'de verilmiştir. BN ve CN serisinde düzlem dışı "60" numuneleri arasında %6 lık düşük bir fark, düzlem dışı "75" numuneleri arasında %31'lik yüksek bir fark bulunmaktadır.



**Şekil 3.17** : Düzlem dışı 0°, 15°, 30°, 90° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri birim şekil değiştirme değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

**Çizelge 3.2 :** BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri birim şekil değiştirme değerleri

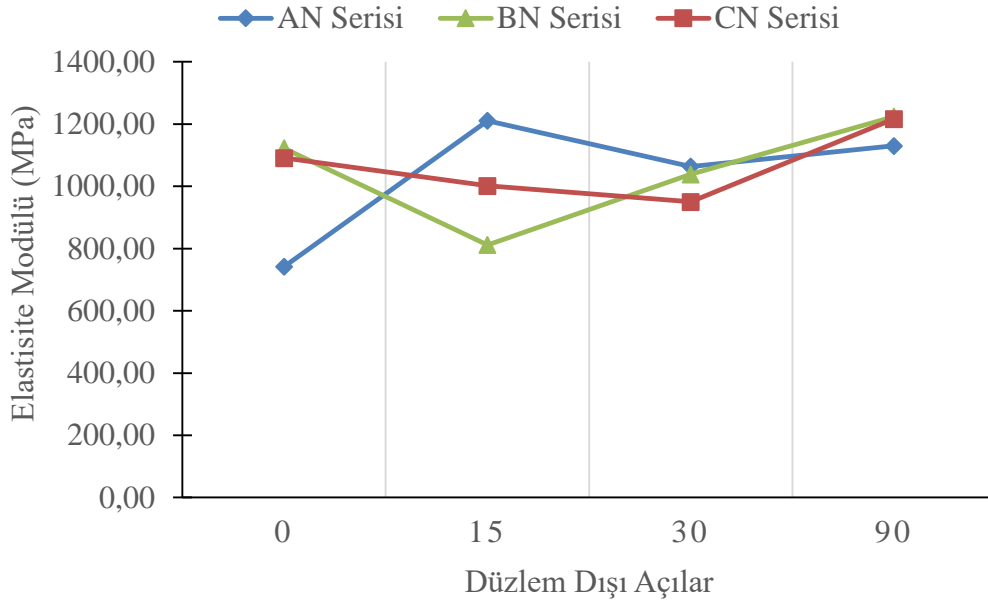
Seri Adı (düzlem içi)	60° düzlem dışı (%)	75° düzlem dışı (%)
BN Serisi	2,40	2,86
CN Serisi	2,26	2,17

### 3.1.2.3 Elastisite modülü

Tüm seriler için 0°, 15°, 30° ve 90° düzlem dışı konumlarda üretilen numuneler değerlendirilmiştir.

Şekil 3.18 değerlendirildiğinde, düzlem dışı açılarda birim şekil değiştirmeye %52'ye varan etkisinin olduğu görülmektedir. En yüksek değerler genel olarak AN serisinde gözlenmiştir. Fakat serileri ortalama elastisite değerleri birbirine yakındır.

Ayrıca BN ve CN serilerinde düzlem dışında 0°'den 30°'ye giderken genel olarak birim şekil değiştirme değerlerinde bir düşüş olduğu, 30°'den 90°'ye giderken ise bir artış olduğu görülmektedir.



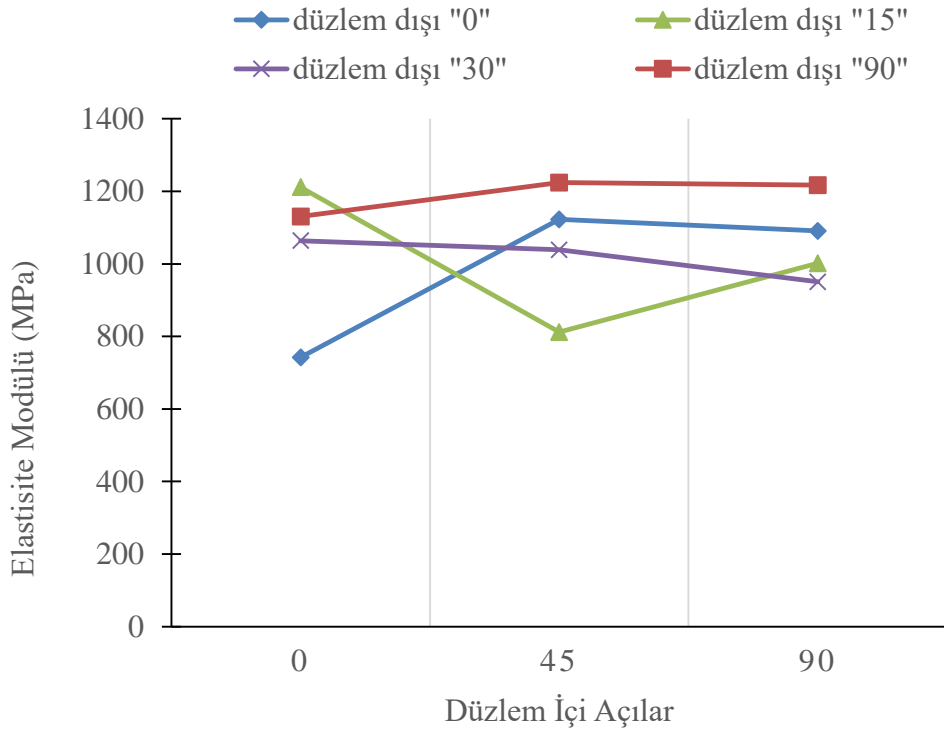
**Şekil 3.18 :** Düzlem içi konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri (Seriler) elastisite modülü değerlerinin düzlem dışı 0°, 15°, 30° ve 90° açılarda konumlandırılmış numunelere göre kıyaslaması

Şekil 3.19 değerlendirildiğinde, düzlem içi açılarda akma gerilmesine %49'a varan etkisinin olduğu görülmektedir. Genel olarak düzlem içi dışında 0°'den 90°'ye

giderken birim şekil değiştirme oranında küçük bir azalma olduğu gözlenmektedir. Ancak AN serisinde  $0^\circ$  düzlem dışı açıda meydana gelen sapmanın üretim kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

CN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %63'e varan değişimler, BN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde %50'ye varan değişimler ve AN serisinden elde edilen akma gerilmesi değerlerinde ise %28'e varan değişimler gözlenmiştir.

Düzlem dışı konumlandırmada en yüksek değeri düzlem dışı "90" numuneleri vermektedir. En düşük değeri ise AN serisinden düzlem dışı "0" ve BN serisinden düzlem dışı "15" numunelerinin verdiği görülmektedir.



**Şekil 3.19** : Düzlem dışı  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri elastisite modülü değerlerinin serilere (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) göre kıyaslaması

Yalnızca BN ve CN serileri için ise  $60^\circ$  ve  $75^\circ$ 'de düzlem dışı konumlarda üretilen numunelerden elde edilen elastisite modülü değerleri çizelge 3.2'de verilmiştir. Düzlem dışı "75" numunelerinden elde edilen değer birbirine çok yakındır. BN serisinde düzlem dışı "60" numunelerinden elde edilen değer, CN serisindeki düzlem dışı "60" numunelerinden elde edilen değerden %18 daha azdır.



**Çizelge 3.3** : BN ve CN serilerinde (düzlem içi konumlandırılmış numuneler) yeralan düzlem dışı 60° ve 75° açılarda konumlandırılmış PACF basma deneyi numuneleri elastisite modülü değerleri

Seri Adı (düzlem içi)	60° düzlem dışı (MPa)	75° düzlem dışı (MPa)
BN Serisi	1119,72	1268,00
CN Serisi	1368,32	1216,75

### 3.1.3 PEKK çekme sonuçlarının değerlendirilmesi

PEKK malzeme çekme deneylerinde kullanılmak üzere elde edilen numuneler, üretim prosesi kaynaklı standart dışı ölçülerde veya hasarlı olması dolayısıyla detaylı değerlendirmeye tabi tutulamamıştır. Toplamda 20 adet numunenin çekme deneyi gerçekleştirilmiş olup, 9 adet numuneden elde edilen veriler değerlendirmeye uygun bulunmuştur.

Şekil 3.20’de destek yapılardan arındırma esnasında hasar almış çekme numunesi gösterilmiştir.



**Şekil 3.20** : Standartta uygun üretilmemiş PEKK çekme numuneleri

Şekil 3.21’de standart numunelerin ölçüleri dışında üretilmiş numune gösterilmiştir. Bazı numuneler yüksek ısı karşısında çarpılmaya maruz kaldığından boyutları standart dışına çıkmıştır.



**Şekil 3.21** : Standartta uygun ölçülerde üretilmemiş PEKK çekme numuneleri

AN serisindeki düzlem dışı açılarda konumlandırılmış numunelerden elde edilen değerler incelendiğinde, düzlem dışı 15°’den 45°’ye giderken akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma gerilmesi değerlerinde bariz düşüş gözlenmektedir.

En yüksek akma gerilmesi değeri, CN serisi düzlem dışı “30” numunesinden alınmıştır. En düşük akma gerilmesi değerleri ise CN serisi düzlem dışı “45” ve “90” numunelerinden alınmıştır.

En yüksek çekme ve kopma gerilmesi değerleri, AN serisi düzlem dışı “30” numunesinden alınmıştır. En düşük çekme ve kopma gerilmesi değerleri ise CN serisi düzlem dışı “90” numunesinden alınmıştır.

En yüksek poisson oranı değerleri genel olarak AN serisinde, en düşük poisson oranı değerleri ise CN serisinde gözlenmektedir.

En yüksek elastisite modülü değeri, CN serisi düzlem dışı “90” numunesinden alınmıştır. En düşük elastisite modülü değeri ise CN serisi düzlem dışı “45” numunesinden alınmıştır.

En yüksek uzama değeri, AN serisi düzlem dışı “15” numunesinden alınmıştır. En düşük uzama değeri ise AN serisi düzlem dışı “60” numunesinden alınmıştır.

CN serisi düzlem dışı “45” numunesinde olağandışı uzama değeri elde edilmiştir. Bu değer prosel kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak AN serisinde düzlem dışı “15” ve “30”, CN serisinden düzlem dışı “30” numunelerinin en iyi mekanik değerleri verdiği söylenebilmektedir.

**Çizelge 3.4 : PEKK çekme deneyi numunelerinden elde edilen tüm değerler**

Seri Adı (düzlem içi açısı)	Düzlem Dışı Açısı (°)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (MPa)	Uzama (%)
AN	15	32,92	38,51	38,51	0,4	2922	1,92
AN	30	31,91	39,66	39,66	0,41	3051	2,12
AN	45	30,65	35,23	35,23	0,21	3027	1,68
AN	60	30,65	34,5	34,5	0,29	2948	1,62
BN	60	28,16	36,6	36,6	0,35	2501	1,83
BN	75	28,32	33,8	33,8	0,31	2822	1,67
CN	30	33,52	37,33	37,33	0,26	2932	1,8
CN	45	21,18	35,46	35,46	-	2192	10,54
CN	90	21,82	31,28	31,28	0,25	3725	1,77

### 3.2 Bilgisayar Destekli Analiz (Sonlu Elemanlar Analizi) için Malzeme Modeli Eldesi

Çalışmada düzlem içi ve düzlem dışı konumlandırmaya göre, PEKK ve PACD malzemeler farklı davranış göstermektedir. Buna göre üretilecek olan parçanın ve parça içerisinde kullanılacak olan küçük birimlerin ve latislerin tasarımı ve hatta parçada yapılacak boşaltmaların tayini parçanın üretim tablasına konumlandırılmasına göre yapılmalıdır.

Malzeme davranışları göz önüne alınarak sonlu elemanlar modeli olarak elastoplastik malzeme modelleri kullanılabilir. PEKK ve PACF malzeme modeli oluşturmak amacıyla kullanılmak üzere optimum dayanım sağlayan malzeme kartı parametreleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 ve 3.2’de belirtilen malzeme parametrelerinde  $\sigma$ , akma gerilmesini,  $\sigma_C$ , çekme gerilmesini,  $\sigma_K$ , kopma gerilmesini,  $\nu$ , poisson oranını,  $\epsilon$ , yüzde uzamayı,  $\epsilon_1$  birim şekil değiştirmeyi, E, elastisite modülünü ve  $\rho$ , yoğunluğu ifade etmektedir.

**Çizelge 3.5 :** Çekme deneyi sonuçlarına göre ortalama değerlere sahip PEKK ve PACF malzeme kartı parametreleri

Malzeme	$\sigma$ (MPa)	$\sigma_C$ (MPa)	$\sigma_K$ (MPa)	$\nu$	$\epsilon$ (%)	E (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
PACF	28,25	50,06	50,06	0,27	18,8	2191,67	1.11
PEKK	30,65	34,5	34,5	0,29	1,62	2948	1.27

PACF çekme deneyi numunelerinden BN serisinden düzlem dışı “45” numunesi ortalama değer olarak alınmıştır.

PEKK çekme deneyi numunelerinden AN serisinden düzlem dışı “60” numunesi ortalama değer olarak alınmıştır.

**Çizelge 3.6 :** Basma deneyi sonuçlarına göre ortalama değerlere sahip PACF malzeme kartı parametreleri

Malzeme	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_1$ (%)	E (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
PACF	58,19	3,29	1122	1.11

PACF basma deneyi numunelerinden BN serisinden düzlem dışı “0” numunesi ortalama değer olarak alınmıştır.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında SLS yöntemi ile, üretim tablasına farklı açılarda konumlandırılmış PEKK, PACF malzemelerinden numuneler üretilmiş ve bu numuneler çekme ve basma deneylerine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve SLS cihazında üretim tablasına konumlandırmanın mekanik değerlere etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, SLS cihazında üretilecek parçanın şekline veya üretim tablasına konumlandırılmasına göre hangi mekanik değerlere sahip olacağı saptanmıştır.

PACF çekme deneylerinde, genellikle akma gerilmesi değeri yüksek olan numunelerin aynı zamanda çekme ve kopma gerilmesi değerlerindeki yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek akma, çekme ve kopma gerilmeleri için, numunenin düzlem içi  $0^\circ$  açıda konumlandırılması gereklidir.

Poisson oranının genellikle akma, çekme ve kopma gerilmesi ile doğru orantıda olduğu saptanmıştır. Yüksek poisson oranı elde edilebilmesi için numunelerin düzlem içi  $0^\circ$  açıda konumlandırılması gerekmektedir.

PACF çekme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek akma gerilmesi elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $0^\circ$  açıda düzlem dışı  $0^\circ$  konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda orta seviye uzama değerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte en yüksek elastisite modülü ve yüksek değerde Poisson oranı elde edilmiş olacaktır.

PACF çekme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek uzama değeri elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $45^\circ$  açıda düzlem dışı  $45^\circ$ 'de konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda orta seviye akma, çekme ve kopma gerilmeleri değerlerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte düşük elastisite modülü ve orta seviyede Poisson oranı elde edilmiş olacaktır.

PACF çekme deneylerinde düzlem içi  $90^\circ$  açıda düzlem dışı  $30^\circ$  veya  $60^\circ$ 'de yüksek uzama değerleri elde edilebilmektedir. Ancak bu durumda en düşük akma, çekme ve

kopma gerilmeleri değerlerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte orta seviyede elastisite modülü ve en düşük seviyede Poisson oranı elde edilmiş olacaktır.

PACF basma deneylerinde, yüksek akma gerilmesi için numunenin düzlem dışı  $90^\circ$  açıda konumlandırılması gereklidir. Aynı şekilde yüksek elastisite modülü elde edilebilmesi için numunelerin düzlem dışı  $90^\circ$  açıda konumlandırılması gerekmektedir.

PACF basma deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek akma gerilmesi elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $90^\circ$  açıda düzlem dışı  $90^\circ$  konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda ortalamanın biraz üzerinde birim şekil değiştirme değerine değerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte yüksek elastisite modülü de elde edilmiş olacaktır.

PACF basma deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek birim şekil değiştirme değeri elde edilmesi için parçanın tabla üzerine düzlem içi  $90^\circ$  açıda, düzlem dışı  $0^\circ$ 'de konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda orta seviye akma gerilmesi ve en düşük seviye elastisite modülü değerlerine sahip olunacaktır.

PACF basma deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en elastisite değeri elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $0^\circ$  açıda düzlem dışı  $60^\circ$ 'de konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda orta seviye akma gerilmesi ve orta seviye altında birim şekil değiştirme değerlerine sahip olunacaktır.

PACF basma deneylerinden elde edilen akma gerilmesi değerleri, PACF çekme deneylerinden elde edilen değerlerin ortalama iki katıdır. Buna karşın PACF çekme deneylerinden elde edilen elastisite modülü değerleri, PACF basma deneylerinden elde edilen değerlerin ortalama iki katıdır.

PACF çekme deneylerinden elde edilen uzama değerler, PACF basma deneylerinden elde edilen birim şekil değiştirme değerlerinin çok fazla üzerinde olup, ortalama altı katıdır.

PEKK çekme deneylerinde, genellikle akma gerilmesi değeri yüksek olan numunelerin aynı zamanda çekme ve kopma gerilmesi değerlerinde yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek poisson oranı elde edilebilmesi için ise numunelerin düzlem içi  $90^\circ$  açıda, düzlem dışı  $30^\circ$  konumlandırılması gerekmektedir.

PEKK çekme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek akma gerilmesi elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $0^\circ$  açıda düzlem dışı  $30^\circ$  konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda çok düşük uzama değerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte en yüksek elastisite modülü ve orta seviyede Poisson oranı elde edilmiş olacaktır.

PEKK çekme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda en yüksek uzama değeri elde edilmesi için, parçanın tabla üzerine düzlem içi  $0^\circ$  açıda düzlem dışı  $45^\circ$ 'de konumlandırılması gerekmektedir. Ancak bu durumda en düşük akma, çekme ve kopma gerilme değerlerine sahip olunacaktır. Bununla birlikte düşük elastisite modülü ve en düşük Poisson oranı elde edilmiş olacaktır.

PACF ve PEKK çekme deneylerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda PEKK numunelerinin akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma gerilmesi, Poisson oranı, elastisite modülü değerlerinin birbirine yakın olduğu fakat PACF çekme numunelerinin daha yüksek değerlere sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat PEKK çekme numunelerinin uzama değerleri PACF çekme numunelerinin oldukça altındadır.

Tüm numunelerde mevcut teknikte işlenmiş malzeme verilerine kıyasla daha düşük mekanik değerler elde edilmiştir. Bunun sebebinin sinterleme prosesi olduğu söylenebilir.

Bu çalışmanın devamında test edilmiş numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenerek malzemelerin kırılma davranışı saptanabilir. Malzeme karakterizasyonu yapılarak sinterleme oranı, yapıdaki boşluklar, PACF malzeme içerisindeki karbon fiber dağılımı ve bunların mekanik özelliklere etkisi tayin edilebilir.

Aynı zamanda üç nokta eğme ve kayma testleri yapılarak PACF ve PEKK malzemelerin eğmeye ve burulmaya karşı davranışı incelenebilir.

Ayrıca, proses parametrelerinin özellikle üretim ortamındaki oksijen seviyesi ve lazer gücü parametrelerinin PACF ve PEKK malzeme davranışı üzerine etkisi incelenebilir. Bu parametreler kontrol altına alınarak PACF ve PEKK malzemelerinin mekanik dayanımında artış ve daha yüksek uzama elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Gibson I, Stucker B, Rosen DW.** (2010). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Springer, New York.
- [2] **University of Twente.** (2016). *Additive Manufacturing Processes*, Erişim: 16.05.2016, [https://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design\\_engineering/rm/Additive%20Manufacturing/overview-of-additive-manufacturing-processes/](https://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design_engineering/rm/Additive%20Manufacturing/overview-of-additive-manufacturing-processes/)
- [3] **ASTM International,** *Standart Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, (2016).
- [4] **Hopkinson, Neil.** (2006). *Production Economics of Rapid Manufacture-In Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. England, John Wiley & Sons.
- [5] **Santos EC, Shiomi M, Osakada MK, Laou T.** (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1459-1468.
- [6] **Dt. Ayça AÇIKALIN.** (2014). *Lazer sinterize alaşımların biyoyumluluklarının döküm alaşımlar ile karşılaştırılması*, Çukurova Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [7] **Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M., Duysak, A.** (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 1302-1355.
- [8] **Hamed Zeinalabedini.** (2015). *Homogenization of additively manufactured polymeric foams with spherical cells*, Istanbul Technical University, Istanbul.
- [9] **Material jetting - MJ, NPJ, DOD,** (t.y.). Erişim: 15.05.2019, <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting/>
- [10] **Raja, V., Fernands, K. J..** (2008). *Reverse Engineering-An Industrial Perspective*. London: Springer, 123-198.
- [11] **Şahin, Y.** (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara: Gazi Kitapevi, 73-75.
- [12] **Demircioğlu, G.** (2006). *Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [13] **Mengxue Yan, Xiaoyong Tian, Gang Peng, Dichen Li, Xiaoyu Zhang.** (2018). High temperature rheological behavior and sintering kinetics of CF/PEEK composites during selective laser sintering, *Composites Science and Technology*, 165, 140-147.

- [14] **Patrice Peyre\*, Yann Rouchausse, Denis Defauchy, Gilles Régnier.** (2017). Experimental and numerical analysis of the selective laser sintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers, *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 326-336.
- [15] **Xiaohu Deng, Zhi Zeng, Bei Peng, Shuo Yan, Wenchao Ke.** (2018). Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling, *Materials 2018*, 11(2), 216.
- [16] **A. A. Zhansitov, A. L. Slonov, R. A. Shetov, A. E. Baikaziev, K. T. Shakhmurzova, Zh. I. Kurdanova, S. Yu. Khashirova.** (2018). Synthesis and Properties of Polyetheretherketones for 3D Printing, *Fibre Chemistry*, 49, 414–419.
- [17] **M. Schmidt, D. Pohle, T. Rechtenwald.** (2007). Selective Laser Sintering of PEEK, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1, 205-208.
- [18] **BS EN ISO 527-1:2012**, *Plastics-Determination of tensile properties*, 2012.
- [19] **BS EN ISO 604:2003**, *Plastics-Determination of compressive properties*, 2003.
- [20] **STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş.** (t.y). Erişim: 15.07.2019,  
[https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/1472017131430826\\_satm\\_bb\\_17\\_0200\\_sektor\\_raporlari\\_katmanli\\_260417.pdf/](https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/1472017131430826_satm_bb_17_0200_sektor_raporlari_katmanli_260417.pdf/)
- [21] **S.Berretta, K.E.Evans, O.Ghita.** (2015). Processability of PEEK, a new polymer for High Temperature Laser Sintering (HT-LS), *European Polymer Journal*, 68, 243-266.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Alperen Bayram  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 08/11/1988-Osmangazi  
**E-posta** : alperenbayram@live.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, Bursa Teknik Üniversitesi, İleri Teknolojiler ABD, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ar-Ge Proje Sorumlusu, Coşkunöz Kalıp Makina Ticaret ve Sanayi A.Ş, Ar & Ge, (2016-)
- Fikri Haklar ve Teşvik Sorumlusu, Coşkunöz Kalıp Makina Ticaret ve Sanayi A.Ş, Ar & Ge, (2015-2017)
- Ar-Ge Sorumlusu, Ermaksan Makina Ticaret ve Sanayi A.Ş, Ar & Ge, (2013-2014)