



**T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**FDM 3D BASKI TEKNOLOJİSİNDE OPTİMAL PARAMETRELERİN  
BELİRLENMESİ VE PARÇA KALİTESİNİN ANALİZİ: SİSTEMATİK BİR  
İNCELEME VE PRATİK UYGULAMALAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FURKAN BALIKÇI**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. İDRİS KARAGÖZ**

**YALOVA  
Temmuz, 2025**



**T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**FDM 3D BASKI TEKNOLOJİSİNDE OPTİMAL PARAMETRELERİN  
BELİRLENMESİ VE PARÇA KALİTESİNİN ANALİZİ: SİSTEMATİK BİR  
İNCELEME VE PRATİK UYGULAMALAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FURKAN BALIKÇI  
228115001**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. İDRİS KARAGÖZ**

**YALOVA  
Temmuz, 2025**

## ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “FDM 3D Baskı Teknolojisinde Optimal Parametrelerin Belirlenmesi ve Parça Kalitesinin Analizi: Sistematik Bir İnceleme ve Pratik Uygulamalar” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Furkan BALIKÇI



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde, akademik bilgi ve deneyimlerini benimle cömertçe paylaşan, yönlendirmeleriyle araştırma sürecimin her aşamasına değerli katkılar sunan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. İdris Karagöz ve Doç. Dr. Harun Sepetçioğlu'na en derin şükranlarımı sunarım.

Uygulama sürecinde gösterdiği özverili katkılar ve sağladığı pratik destek dolayısıyla Tuana Orhun'a içten teşekkürlerimi iletmek isterim.

Ayrıca, tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve yazım aşamalarında her daim yanımda olan; sabrı, anlayışı ve manevi desteğiyle bu süreci benim için daha anlamlı ve sürdürülebilir kılan sevgili nişanlım Mehtap ERDİNÇ'e gönülden teşekkür ederim.

Temmuz – 2025

Furkan BALIKÇI

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                       |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| İÇİNDEKİLER.....                                                                      | iii  |
| <b>SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....                                          | v    |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                                | vi   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                                 | vii  |
| <b>ÖZET</b> .....                                                                     | viii |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                                 | ix   |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                                 | 1    |
| <b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....                                                        | 3    |
| 2.1. Katmanlı İmalatın Tanımı ve Tarihçesi.....                                       | 3    |
| 2.2. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Sınıflandırılması .....                         | 4    |
| 2.3. Katmanlı İmalatın Endüstrideki Yeri ve Uygulama Alanları .....                   | 5    |
| 2.4. Türkiye’de Katmanlı İmalat Ekosistemi.....                                       | 5    |
| 2.5. 3D Baskı Teknolojilerinin Tarihçesi ve Gelişim Süreci.....                       | 6    |
| 2.6. FDM Teknolojisinin Çalışma Prensipleri ve Malzeme Özellikleri .....              | 6    |
| 2.7. Baskı Parametrelerinin FDM Parça Kalitesine Etkisi: Derinlemesine İnceleme ..... | 7    |
| 2.7.1. Katman Kalınlığı .....                                                         | 7    |
| 2.7.2. İç Doluluk Oranı.....                                                          | 8    |
| 2.7.3. Kabuk Sayısı ve Kabuk Kalınlığı.....                                           | 8    |
| 2.7.4. Ekstruder (Nozzle) Sıcaklığı .....                                             | 9    |
| 2.7.5. Baskı Hızı.....                                                                | 9    |
| 2.8. FDM Baskı Parçalarının Mekanik ve Termal Analizleri.....                         | 9    |
| 2.9. Parametrelerin Çoklu Etkileşimleri ve Optimizasyon Çalışmaları.....              | 10   |
| 2.10. Endüstriyel Uygulamalar ve Sürdürülebilirlik Perspektifi .....                  | 10   |
| 2.11.FDM Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....                     | 10   |
| 2.11.1. ABS Malzemenin Özellikleri ve FDM’deki Önemi .....                            | 11   |
| 2.11.2. FDM Prosesinde ABS Kullanımına Özgü Zorluklar .....                           | 11   |
| 2.11.3. ABS’nin Mekanik ve Termal Özellikleri .....                                   | 11   |
| 2.11.4. FDM Baskı Parametrelerinin ABS Üzerindeki Etkileri .....                      | 12   |
| 2.12. FDM Teknolojisinde Literatür Özeti ve Boşluklar.....                            | 12   |
| 2.12.1 FDM Parametrelerinin Mekanik Performansa Etkisi.....                           | 12   |
| 2.12.2. Malzeme Gelişmeleri ve Yeni Filament Türleri .....                            | 13   |
| 2.12.3. Mikrostruktur ve Katmanlar Arası Yapışma .....                                | 13   |
| 2.12.4 Proses Optimizasyonu ve Modelleme Yaklaşımları .....                           | 13   |
| 2.12.5. Endüstriyel Uygulamalar ve Sürdürülebilirlik .....                            | 14   |

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL .....</b>            | <b>15</b> |
| 3.1. Kullanılan Malzemeler .....                       | 15        |
| 3.1.1. ABS Malzemesinin Temel Özellikleri .....        | 16        |
| 3.1.2. Yazıcı ve Yazılım Detayları .....               | 16        |
| 3.1.3 Baskı Sürecinin Kontrolü ve Kalibrasyonu .....   | 19        |
| 3.2. Deneysel Yöntem .....                             | 20        |
| 3.2.1. Üretim Süreci ve Karakterizasyon .....          | 21        |
| <b>4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>           | <b>25</b> |
| 4.1. Çekme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....    | 25        |
| 4.2. Eğme Testi Sonuçları ve Yorumları.....            | 25        |
| 4.3. Darbe Testi Performansı ve Parametrik Analiz..... | 25        |
| 4.4. Sonuç ve Yorumlar.....                            | 26        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                  | <b>50</b> |

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

### SİMGELER

|                 |                                                      |
|-----------------|------------------------------------------------------|
| E               | : Young's Modulus (Elastik Modül)                    |
| F               | : Infill Density (Doluluk Oranı)                     |
| L               | : Layer Thickness (Katman Kalınlığı)                 |
| S               | : Printing Speed (Baskı Hızı)                        |
| $\Sigma_{max}$  | : Ultimate Tensile Strength (Maksimum Gerilme)       |
| $\Sigma_f$      | : Flexural Strength (Eğilme Dayanımı)                |
| E               | : Elongation at Break (Kopma Uzaması)                |
| $\text{kJ/m}^2$ | : Kilojoule per square meter (Darbe Dayanımı Birimi) |

### KISALTMALAR

|       |                                                                                                  |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3D    | : Three-Dimensional (Üç Boyutlu)                                                                 |
| ABS   | : Acrylonitrile Butadiene Styrene (Akrilonitril Bütadien Stiren - Yüksek Dayanımlı Termoplastik) |
| AM    | : Additive Manufacturing (Katmanlı İmalat)                                                       |
| ANOVA | : Analysis of Variance (Varyans Analizi)                                                         |
| ASTM  | : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)                  |
| CAD   | : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)                                            |
| DOE   | : Design of Experiments (Deney Tasarımı)                                                         |
| DSC   | : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri)                          |
| DLP   | : Digital Light Processing (Dijital Işık İşleme)                                                 |
| EBM   | : Electron Beam Melting (Elektron Işınıyla Ergitme)                                              |
| FDA   | : Food and Drug Administration (ABD Gıda ve İlaç Dairesi)                                        |
| FDM   | : Fused Deposition Modeling (Ergitilerek Yığılma Modelleme)                                      |
| GPa   | : Gigapascal (Basınç birimi, 1 GPa = 1 milyar Pascal)                                            |
| ISO   | : International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)               |
| kJ    | : Kilojoule/metrekaare (Darbe Dayanımı Birimi)                                                   |
| MPa   | : Megapascal (Basınç birimi, 1 MPa = 1 milyon Pascal)                                            |
| Nx    | : Siemens NX (Mühendislik ve CAD yazılımı)                                                       |
| PA    | : Polyamide (Poliamid, örn. Nylon)                                                               |
| PEEK  | : Polyether Ether Ketone (Yüksek Performanslı Mühendislik Termoplastik)                          |
| PETG  | : Polyethylene Terephthalate Glycol (Polietilen Tereftalat Glikol)                               |
| PLA   | : Polylactic Acid (Polilaktik Asit)                                                              |
| SEM   | : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)                                    |
| SLA   | : Stereolithography (Stereolitografi)                                                            |
| SLS   | : Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)                                            |
| TGA   | : Thermogravimetric Analysis (Termo Gravimetrik Analiz)                                          |
| Tg    | : Glass Transition Temperature (Cam Geçiş Sıcaklığı)                                             |
| TPU   | : Thermoplastic Polyurethane (Termoplastik Poliüretan - Esnek Filament)                          |
| UTS   | : Ultimate Tensile Strength (Maksimum Çekme Dayanımı)                                            |
| UV    | : Ultraviolet (Morötesi Işık)                                                                    |
| YTÜ   | : Yıldız Teknik Üniversitesi                                                                     |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1.</b> Tarihsel Gelişim Özet.....                                            | 4  |
| <b>Tablo 3.1.</b> ABS'nin Tipik Özellikleri .....                                       | 16 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Proses Parametreleri .....                                            | 21 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Deneysel Nominal Çekme ve Nominal Eğme Özelliklerinin Sonuçları ..... | 26 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Deneysel Gerçek Çekme ve Gerçek Eğme Özelliklerinin Sonuçları .....   | 27 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Deneysel Nominal Darbe Dayanımı Sonuçları .....                       | 29 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Deneysel Gerçek Darbe Dayanımı Sonuçları.....                         | 30 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. FDM Teknolojisinin Çalışma Prensipleri .....                                | 7  |
| Şekil 3.1. FlashForge 3D Arayüz Ekranında Extruder Temperature Ayarı .....             | 17 |
| Şekil 3.2. FlashForge 3D Arayüz Ekranında Layer Height ve Base Print Speed Ayarı ..... | 17 |
| Şekil 3.3. FlashForge 3D Arayüz Ekranında Fill Density Ayarı .....                     | 18 |
| Şekil 3.4. FlashForge Guider 2 ile Çekme Numunesinin Üretim Aşaması.....               | 18 |
| Şekil 3.5. FlashForge Guider 2 ile Darbe Numunesinin Üretim Aşaması .....              | 19 |
| Şekil 3.6. Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Çekme Testi Numunesi .....     | 22 |
| Şekil 3.7. Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Eğme Testi Numunesi .....      | 22 |
| Şekil 3.8. Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Darbe Testi Numunesi .....     | 23 |
| Şekil 3.9. Çekme Test Uygulaması .....                                                 | 23 |
| Şekil 3.10. Eğme Test Uygulaması .....                                                 | 24 |
| Şekil 3.11. Darbe Test Cihazı .....                                                    | 24 |
| Şekil 4.1. Nominal Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği.....                               | 26 |
| Şekil 4.2. Nominal Eğilme Gerilmesi-Şekil Değiştirme Grafiği .....                     | 27 |
| Şekil 4.3. Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği .....                               | 28 |
| Şekil 4.4. Gerçek Eğilme Gerilmesi-Şekil Değiştirme Grafiği .....                      | 28 |
| Şekil 4.5. Çentikli Nominal Darbe Dayanımı Grafiği.....                                | 29 |
| Şekil 4.6. Çentiksiz Nominal Darbe Dayanımı Grafiği .....                              | 29 |
| Şekil 4.7. Çentiksiz Gerçek Darbe Dayanımı Grafiği.....                                | 31 |
| Şekil 4.8. Çentikli Gerçek Darbe Dayanımı Grafiği .....                                | 31 |
| Şekil 4.9. T235S40F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği.....                              | 32 |
| Şekil 4.10. T235S60F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği.....                             | 33 |
| Şekil 4.11. T235S80F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği.....                             | 33 |
| Şekil 4.12. T235L0.36F20 kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği .....                          | 34 |
| Şekil 4.13. T245S80F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği.....                             | 35 |
| Şekil 4.14. T255S80F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği.....                             | 35 |
| Şekil 4.15. T235S40F20 SEM Görüntüsü.....                                              | 37 |
| Şekil 4.16. T235S60F20 SEM Görüntüsü.....                                              | 38 |
| Şekil 4.17. T235S80F20 SEM Görüntüsü.....                                              | 39 |
| Şekil 4.18. T235L0.24F20 SEM Görüntüsü .....                                           | 40 |
| Şekil 4.19. T235L0.24F50 SEM Görüntüsü .....                                           | 40 |
| Şekil 4.20. T235S80F100 SEM Görüntüsü.....                                             | 41 |
| Şekil 4.21. T235L0.36F20 SEM Görüntüsü .....                                           | 42 |
| Şekil 4.22. T245S80F20 SEM Görüntüsü.....                                              | 42 |
| Şekil 4.23. T255S80F20 SEM Görüntüsü.....                                              | 43 |

# **FDM 3D BASKI TEKNOLOJİSİNDE OPTİMAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE PARÇA KALİTESİNİN ANALİZİ: SİSTEMATİK BİR İNCELEME VE PRATİK UYGULAMALAR**

## **ÖZET**

3D baskı teknolojisi, günümüzde endüstriyel ve kişisel kullanımlar arasında hızla yayılan bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu yenilikçi teknoloji, ürün prototiplerinden sanat eserlerine, medikal implantlardan endüstriyel parçalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. 3D yazıcılar arasındaki farklar, kullanılan malzeme türü ve teknolojiye göre belirlenmektedir. Bu alandaki en yaygın yöntemlerden biri olan FDM (Eriyik Yığılma Modelleme/Fused Deposition Modeling), özellikle masaüstü 3D yazıcılarda tercih edilen bir tekniktir. FDM yöntemiyle parçalar, katman katman termoplastik malzeme eritilerek oluşturulur. Ancak, FDM yöntemiyle üretilen parçaların kalitesi, kullanılan 3D yazıcı parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanması, parçanın mekanik dayanıklılığı, yüzey pürüzlülüğü, boyut doğruluğu ve genel estetiği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olabilir. Bu bağlamda, bu tez çalışması FDM yöntemiyle üretilen parçalarda kullanılan 3D yazıcı parametrelerinin parça özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu araştırma, doğru parametrelerin belirlenmesiyle sağlanabilecek en iyi sonuçları anlamak için sistematik bir yaklaşım benimsemektedir. Parametrelerin seçimi, 3D baskı kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, çalışma, endüstriyel ve kişisel kullanımlar için ideal 3D baskılar üretme sürecinde değerli bir rehber oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın elde edeceği bulgular, araştırmacılar, endüstri profesyonelleri ve hobiler için 3D baskı alanındaki gelecekteki projeleri ve keşifleri yönlendirmede önemli bir rol oynayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** FDM, Eriyik Yığılma Modellemesi, 3D Yazıcı, 3D Yazıcı Parametreleri, Parça Kalitesi

# **DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS AND ANALYSIS OF PART QUALITY IN FDM 3D PRINTING: A SYSTEMATIC REVIEW AND PRACTICAL APPLICATIONS**

## **ABSTRACT**

3D printing technology has emerged as a rapidly expanding manufacturing method in both industrial and personal applications. This innovative technology is utilized across a wide range of fields, from product prototypes to works of art, from medical implants to industrial components. The differences between 3D printers are determined by the type of material used and the underlying technology. One of the most common methods in this field is FDM (Fused Deposition Modeling), which is particularly preferred in desktop 3D printers. In the FDM method, parts are produced by melting thermoplastic material and depositing it layer by layer. However, the quality of parts produced using the FDM method depends heavily on the 3D printer parameters employed. Proper adjustment of these parameters can have a decisive impact on the mechanical strength, surface roughness, dimensional accuracy, and overall aesthetics of the printed part. In this context, this thesis aims to systematically examine the effects of 3D printer parameters on part properties in components manufactured using the FDM method. This research adopts a systematic approach to understand the optimal results that can be achieved by selecting the appropriate parameters. The choice of parameters is a critical factor influencing 3D printing quality. Therefore, this study aims to provide a valuable guide in the process of producing ideal 3D prints for both industrial and personal applications. The findings of this study will play an important role in guiding future projects and explorations in the field of 3D printing for researchers, industry professionals, and hobbyists alike.

**Keywords:** FDM, Melt Deposition Modeling, 3D Printer, 3D Printer Parameters, Part Quality

## 1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının temel amacı, katmanlı üretim teknolojilerinden biri olan ve günümüzde özellikle prototiplemeden son kullanım ürünlerine kadar birçok alanda yaygınlık kazanan FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemiyle üretilen üç boyutlu baskı parçalarının nihai performansını doğrudan etkileyen başlıca baskı parametrelerinin özellikle katman kalınlığı, iç doluluk oranı, ekstrüder sıcaklığı, baskı hızı gibi faktörlerin çok boyutlu ve sistematik bir yaklaşımla hem teorik hem deneysel düzlemde detaylı şekilde incelenmesi; söz konusu parametrelerin üretilen parçaların mekanik özellikleri (çekme dayanımı, eğilme mukavemeti, darbe dayanıklılığı gibi), termal davranışları (DSC analizi ile cam geçiş sıcaklığı, erime noktası, kristalizasyon derecesi gibi), yüzey özellikleri (pürüzlülük, katman izleri, estetik görünüm) ve boyutsal doğrulukları üzerindeki etkilerinin ampirik veriler aracılığıyla analiz edilmesi; deneysel çalışmaların istatistiksel analiz yöntemleri (varyans analizi, regresyon modelleme, çok kriterli karar verme yaklaşımları vb.) ile desteklenerek, parametreler arası olası etkileşimlerin nicel olarak ortaya konması ve elde edilen sonuçlara dayanarak maksimum yapısal bütünlük, fonksiyonel uygunluk, estetik kalite ve maliyet etkinliği sağlayacak en uygun baskı parametresi kombinasyonlarının çok parametrelili optimizasyon teknikleriyle belirlenmesi; ayrıca elde edilen bulgular doğrultusunda, hem endüstriyel üretim ölçeğinde hem de kişisel/amatör kullanım bağlamında uygulanabilirliği yüksek olan, malzeme tüketimini azaltan, enerji verimliliğini artıran ve çevresel sürdürülebilirliği gözetilen üretim stratejilerinin geliştirilmesi; bu kapsamda elde edilen bilgi birikiminin mevcut literatürdeki önemli boşlukları doldurarak, 3D baskı teknolojisinin kalite kontrol, üretim verimliliği ve ürün fonksiyonelliği bağlamlarında daha ileri düzey uygulamalara taşınmasına katkı sağlaması ve ilerleyen dönemlerde yapılacak akademik araştırmalar ile sektörel Ar-Ge faaliyetlerine özgün ve güvenilir bir referans kaynağı oluşturmasıdır. Bu tez çalışması, FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisi ile üretilen parçaların kalite düzeyini etkileyen en kritik baskı parametrelerinden katman kalınlığı, iç doluluk oranı, ekstrüder sıcaklığı ve baskı hızının, parçaların mekanik dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluğu ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini çok boyutlu ve sistematik bir yaklaşımla ortaya koymayı amaçlamaktadır. Katman kalınlığı, bir parçanın hem görsel estetiğini hem de yapısal bütünlüğünü doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir; daha ince katmanlar, baskı yüzeyinde katman izlerini azaltarak daha düzgün ve detaylı bir yüzey kalitesi sunarken, aynı zamanda katmanlar arası yapışmayı güçlendirerek parçanın çekme, eğilme ve darbe gibi mekanik yükler altındaki dayanımını artırabilmektedir. Öte

yandan, daha kalın katmanlar baskı süresini kısaltsa da yüzey kalitesinde bozulmalara ve mekanik performansta azalmaya neden olabilmektedir. İç doluluk oranı ise parçanın iç yapısının yoğunluğunu ve destek yapısının sertliğini belirlemesi açısından kritik rol oynamaktadır; doluluk oranının artırılması ile birlikte parça daha rijit ve dayanıklı hâle gelmekte, özellikle darbe ve eğilme dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Ancak bu durum, aynı zamanda üretim süresinin uzamasına, malzeme sarfiyatının artmasına ve enerji tüketiminin yükselmesine yol açarak üretim maliyetlerini olumsuz etkileyebilmektedir. Ekstrüder sıcaklığı ise kullanılan filamentin termoplastik özelliklerine uygun şekilde belirlenmelidir; zira optimal sıcaklık aralığının altında kalan değerlerde filament yeterince akışkan hale gelemediği için katmanlar arası yapışma zayıflamakta, bu da hem mekanik özelliklerde zayıflamalara hem de iç yapıda gözenekliliğe neden olmaktadır. Aşırı yüksek sıcaklıklarda ise malzeme bozunarak hem fiziksel deformasyonlara hem de termal özelliklerin bozulmasına neden olabilmekte, bu da parça bütünlüğünü tehlikeye sokmaktadır. Baskı hızı da üretim süreci ile doğrudan ilişkili olmakla birlikte, belirli sınırların üzerindeki hızlar filamentin düzgün bir şekilde tabaka üzerine yerleşmesini zorlaştırarak katmanlar arası bağ kuvvetini zayıflatmakta ve buna bağlı olarak hem mekanik dayanım hem de yüzey kalitesi üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Ayrıca yüksek baskı hızlarında parçanın köşe ve kenar bölgelerinde deformasyonlar ve ölçüsel sapmalar gözlemlenmekte, bu da özellikle fonksiyonel parçalarda ciddi boyutsal uyumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu dört parametrenin her biri yalnızca bireysel olarak değil, aynı zamanda karşılıklı etkileşimleri bağlamında da parça kalitesi üzerinde belirleyici olmaktadır; örneğin, düşük katman kalınlığı ile yüksek doluluk oranının birlikte kullanılması, parça dayanımında önemli gelişmelere yol açabilirken, bu kombinasyonun yüksek baskı hızıyla uygulanması baskı kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, parametrelerin etkileşimli yapısını göz önünde bulunduran çok faktörlü deney tasarımı ve istatistiksel analiz yöntemlerinin uygulanması, FDM sürecinde en uygun baskı koşullarının belirlenmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Tezin bu kapsamda ortaya koyacağı bulgular hem akademik hem de endüstriyel bağlamda yüksek kaliteli, maliyet etkin ve fonksiyonel 3D baskı üretimi için temel oluşturacaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Katmanlı İmalatın Tanımı ve Tarihçesi

Katmanlı İmalat (Additive Manufacturing-AM), dijital model verilerinden başlayarak, malzemeyi katman katman ekleyerek üç boyutlu fiziksel nesnelerin üretilmesini sağlayan modern bir üretim teknolojisidir. Bu üretim yöntemi, geleneksel talaşlı imalat gibi çıkarıcı tekniklerden farklı olarak, yalnızca gerekli malzemenin kullanılmasıyla hammadde israfını minimize eder. AM, CAD (Computer Aided Design) veya tarayıcılar tarafından oluşturulan dijital modellerin, kesitlere ayrılması (slicing) yoluyla işlenmesini ve ardından bu kesitlerin katman katman fiziksel ortama dönüştürülmesini içerir (Gibson vd., 2021). İlk olarak 1980'lerde patentlenen teknolojilerle başlayan AM, günümüzde prototiplemeden uçak motoru parçalarına kadar birçok endüstri alanında kritik roller üstlenmektedir. 1981 yılında Hideo Kodama'nın geliştirdiği ilk fotopolimer sertleştirme yöntemi, 1986'da Charles Hull tarafından patentlenen SLA (Stereolithography) teknolojisiyle ticarileşmiştir. Bu teknoloji, sıvı reçinenin ultraviyole lazer ışını ile katman katman sertleştirilmesini esas alır. 1989'da Scott Crump'un FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisini geliştirmesiyle AM'nin erişilebilirliği ve popüleritesi arttı. FDM yöntemi, termoplastik filamentin ısıtılarak eritilip kontrollü şekilde nozuldan çıkışıyla katman oluşturur ve maliyet avantajı sunar. 1990'larda metal tozları kullanılarak lazer veya elektron ışını ile sinterleme yapan SLS ve EBM teknolojileri geliştirildi ve yüksek mukavemetli metal parçalar üretilmeye başlandı. 2000'li yıllarda AM sistemlerinin hızlanması, malzeme çeşitliliğinin artması ve dijitalleşme ile entegrasyonu sayesinde üretim süreçlerinde devrim yaratılmıştır. AM'nin temel avantajları arasında karmaşık geometrilerin üretimi, azalmış hammadde kullanımı, tasarım esnekliği ve kısa üretim süreleri yer alırken; dezavantajları ise yüksek cihaz maliyetleri ve sınırlı malzeme çeşitliliğidir. Günümüzde AM, endüstriyel üretimde hem prototip hem de nihai parça üretimi için tercih edilen önemli bir yöntem haline gelmiştir (Ngo vd., 2018). 2.1.'de Tarihsel Gelişim Özet Tablosu gösterilmektedir.

**Tablo 2.1.** Tarihsel Gelişim Özet Tablosu

| Yıl      | Teknolojik Gelişme                         | Açıklama                                     | Kaynaklar       |
|----------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| 1981     | Hideo Kodama'nın photopolimer prototipleme | İlk katmanlı üretim yöntemi                  | Kodama, 1981    |
| 1986     | SLA patentlenmesi                          | Sıvı reçinenin UV ışını ile sertleştirilmesi | Hull, 1986      |
| 1989     | FDM geliştirilmesi                         | Termoplastik filament ekstrüzyon yöntemi     | Crump, 1992     |
| 1990'lar | SLS ve EBM metal tozu sinterleme           | Metal parçalar için lazer beam kullanımı     | Kruth vd., 2007 |
| 2000+    | Am'nin endüstriyel yaygınlaşması           | Malzeme çeşitliliği ve üretim hızının artışı | Ngo vd. 2018    |

## 2.2. Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Sınıflandırılması

Katmanlı imalat teknolojileri, ISO/ASTM 52900:2020 standardına göre yedi ana sınıfa ayrılır. İlk sınıf olan Vat Photopolymerization, sıvı fotopolimer reçinenin UV ışığı ile katman katman sertleşmesini içerir ve SLA ile DLP bu gruba dahildir. Bu yöntem yüksek çözünürlük ve detay hassasiyeti sunar ancak malzeme seçenekleri sınırlıdır. İkinci sınıf Material Extrusion ise, FDM teknolojisiyle ilişkilidir ve termoplastik filamentin eritilip katman katman nozuldan çıkışı esasına dayanır. Uygun maliyetli ve yaygın kullanılan bir yöntemdir fakat yüzey kalitesi düşüktür. Üçüncü sınıf Powder Bed Fusion teknolojileri, SLS ve EBM gibi metal ve plastik tozlarının lazer ya da elektron ışını ile seçici olarak eritilip kaynaştırılmasına dayanır. Bu sınıf, karmaşık ve yüksek mukavemetli parçalar üretmede öncü olup maliyet ve enerji tüketimi yüksektir. Dördüncü sınıf Material Jetting yöntemlerinde, sıvı fotopolimer malzeme damla damla püskürtülerek ve UV ile kürlenerek katmanlar oluşturulur; çok renkli ve detaylı prototiplerde tercih edilir. Beşinci sınıf Binder Jetting yönteminde ise toz yatağına bağlayıcı

püskürtülerek katmanlar inşa edilir, ancak üretilen parçaların mekanik dayanımı sınırlıdır. Altıncı sınıf Sheet Lamination teknolojisi tabaka malzemelerin üst üste yapıştırılması veya lehimlenmesi ile çalışır, hızlı üretim sağlar fakat detay seviyesi düşüktür. Son olarak, Directed Energy Deposition yöntemi, metal tozlarının ya da tellerinin lazer veya elektron ışını ile eritilip doğrudan biriktirilmesini sağlar ve genellikle onarım ve büyük parça üretiminde kullanılır (ASTM International, 2020; Gibson vd., 2021). Her teknolojinin malzeme çeşitliliği, uygulama alanı, maliyet ve mekanik özellikler açısından farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

### **2.3. Katmanlı İmalatın Endüstrideki Yeri ve Uygulama Alanları**

Katmanlı imalat, modern endüstriyel üretim süreçlerinde devrim niteliğinde değişiklikler yaratmıştır. Özellikle Endüstri 4.0 konseptiyle entegre edilmesi, üretim esnekliğini ve kişiselleştirme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır (Kamble vd., 2018). Otomotiv sektöründe, AM prototipleme aşamasının hızlandırılması, jigs ve fixture üretimi ile üretim maliyetlerinin azaltılması gibi avantajlar sağlamaktadır. BMW ve Ford gibi otomotiv devleri, AM teknolojilerini seri üretim hattına entegre etmişlerdir. Havacılık ve uzay endüstrisi, hafiflik ve karmaşık yapısal özellik gerektiren parçalarda metal toz yatağı füzyon yöntemlerine yoğun yatırım yapmaktadır. Boeing ve Airbus, motor parçalarından yakıt enjektörlerine kadar AM ile üretilmiş kritik bileşenler kullanmaktadır. Medikal alanda ise kişiye özel implantlar, protezler ve cerrahi modellerin üretimi, hastaların tedavi sürecini iyileştirmektedir. FDA onaylı biyouyumlu malzemelerin geliştirilmesi ile AM'nin sağlık sektöründeki rolü giderek artmaktadır. Savunma sanayinde hızlı prototipleme ve kritik parça üretimi için AM çözümleri tercih edilmektedir. Moda ve tasarım sektöründe ise yenilikçi, kişiselleştirilmiş ürünler yaratmak için katmanlı imalat yaygınlaşmaktadır. Bu alanlarda AM'nin getirdiği tasarım özgürlüğü ve üretim hızı, yeni ürün geliştirme süreçlerini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Ngo vd., 2018; Ventola, 2014).

### **2.4. Türkiye’de Katmanlı İmalat Ekosistemi**

Türkiye, son yıllarda katmanlı imalat teknolojilerinde kayda değer gelişmeler göstermiştir. TÜBİTAK, KOSGEB ve diğer kamu kurumlarının destekleriyle Ar-Ge projeleri hız kazanmıştır (Yılmaz vd., 2021). Türkiye’deki teknik üniversiteler, AM konusunda kapsamlı lisansüstü eğitim programları ve araştırma projeleri yürütmektedir. Özellikle ODTÜ, İTÜ ve YTÜ gibi üniversiteler, malzeme bilimi, proses geliştirme ve kalite kontrol alanlarında ileri düzey çalışmalar yapmaktadır. Sanayide ise yerli 3D yazıcı üreticileri ve filament tedarikçileri artmakta; otomotiv, savunma ve medikal sektörler pilot uygulamalarla teknolojiyi

benimsemektedir. Ancak, yerli malzeme kalitesi ve proses optimizasyonunda halen eksiklikler mevcuttur. Türkiye'nin küresel rekabette söz sahibi olabilmesi için standartlaşma, sertifikasyon ve eğitim altyapısının güçlendirilmesi önemlidir. Bu alanlarda yapılacak yatırımlar, ülkenin katma değerli üretimdeki payını artıracaktır. Ayrıca, start-up ekosistemi ve teknoparkların desteklenmesi yerli inovasyonu hızlandırmaktadır. Genel olarak Türkiye, AM teknolojilerinde gelişmekte olan bir pazardır ve potansiyel büyük olmakla beraber stratejik yatırımlar gerekmektedir (Yılmaz vd., 2021).

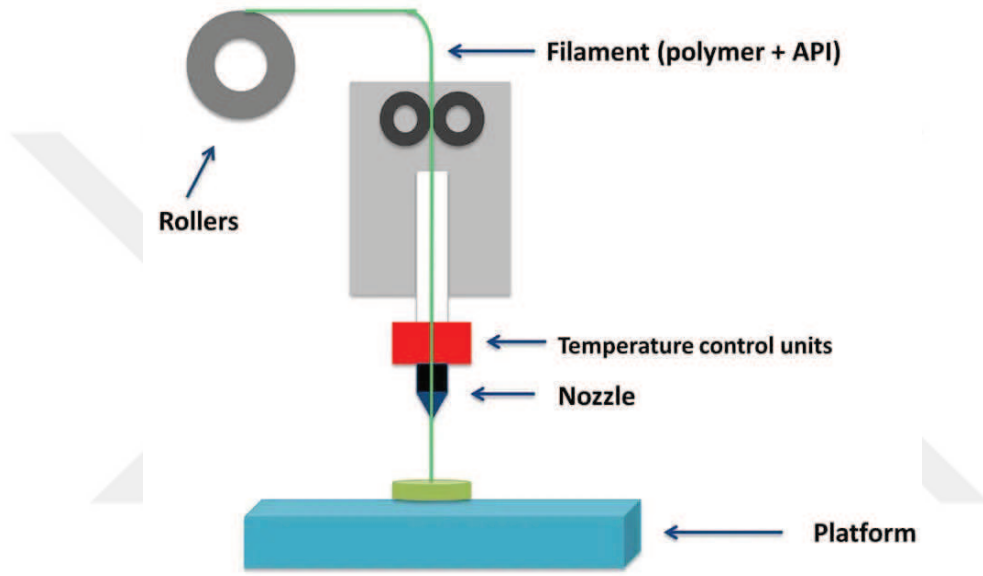
## **2.5. 3D Baskı Teknolojilerinin Tarihçesi ve Gelişim Süreci**

Üç boyutlu baskı teknolojileri, yaklaşık olarak 1980'li yılların başında ortaya çıkmış ve zaman içinde hızlı bir teknolojik evrim geçirerek üretim dünyasında devrim yaratmıştır. İlk olarak Charles Hull tarafından geliştirilen stereolitografi (SLA) yöntemi ile başlayan bu süreç, 3D yazıcıların farklı üretim prensiplerine sahip çeşitli türlerinin geliştirilmesiyle devam etmiştir (Hull, 1986). Başlangıçta endüstriyel prototipleme için kullanılan bu teknoloji, artan erişilebilirliği ve gelişen teknoloji sayesinde günümüzde hem endüstriyel hem de kişisel üretim uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Gibson, Rosen & Stucker vd., 2021). 3D baskı teknolojilerinin gelişimi; üretimde hız, maliyet, esneklik ve tasarım özgürlüğü gibi temel avantajları beraberinde getirmiş, özellikle karmaşık geometrilerin ve kişiye özel ürünlerin üretilmesini mümkün kılmıştır (Ngo vd., 2018). Farklı 3D baskı teknolojileri arasında SLA, SLS (Selective Laser Sintering), DLP (Digital Light Processing) gibi fotopolimer bazlı ve toz sinterleme yöntemlerinin yanı sıra, termoplastiklerin eritilerek katman katman birleştirildiği FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemi öne çıkmaktadır (Turner, Strong & Gold vd., 2014). FDM, özellikle düşük maliyeti, geniş malzeme seçeneği ve kullanım kolaylığı sebebiyle akademik ve endüstriyel çevrelerde en çok tercih edilen baskı teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir (Gurralla & Regalla vd., 2020).

## **2.6. FDM Teknolojisinin Çalışma Prensipleri ve Malzeme Özellikleri**

FDM teknolojisi, termoplastik filamentlerin kontrollü bir şekilde ısıtılarak eriyik hale getirilmesi ve bilgisayar kontrollü hareketle, katman katman yığılması prensibine dayanmaktadır (Crump vd., 1992). Bu katmanların üst üste konmasıyla üç boyutlu nesneler oluşturulmaktadır. Kullanılan filament malzemenin türüne göre (örneğin PLA, ABS, PETG, Nylon) baskı parametreleri ve elde edilen parçanın mekanik ve termal özellikleri farklılık göstermektedir (Ngo vd., 2018). Özellikle PLA ve ABS malzemeleri, uygun mekanik dayanım,

işlenebilirlik ve maliyet dengesi nedeniyle FDM baskıda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gurralla & Regalla vd., 2020). Malzeme özellikleri, FDM baskının kalitesini belirleyen önemli bir unsur olmasının yanı sıra, baskı parametreleriyle birlikte optimize edilmesi gereken karmaşık bir yapıya sahiptir. Örneğin, PLA'nın kristalizasyon davranışı, cam geçiş sıcaklığı ve erime noktası baskı kalitesini ve dayanıklılığını doğrudan etkilerken, ABS'nin yüksek sıcaklık dayanımı ve darbe mukavemeti bazı uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır (Chen & Chen vd., 2020). Şekil 2.1.'de FDM teknolojisinin çalışma prensibini açıklayan görsel belirtilmektedir.



Şekil 2.1 FDM Teknolojisinin Çalışma Prensibi

## 2.7. Baskı Parametrelerinin FDM Parça Kalitesine Etkisi: Derinlemesine İnceleme

FDM baskı kalitesini belirleyen en kritik faktörlerden biri baskı parametreleridir. Literatürde katman kalınlığı, iç doluluk oranı, kabuk sayısı, ekstruder sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerin her birinin ve bu parametrelerin etkileşimlerinin baskı sonucunu doğrudan etkilediği birçok çalışma ile gösterilmiştir (Tümer & Kaynak vd., 2019; Singh & Pandey vd., 2021).

### 2.7.1. Katman Kalınlığı

Katman kalınlığı, baskının yüzey kalitesi ve mekanik dayanıklılığını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Daha ince katmanlar, yüzeyde daha az katman çizgisi görünmesine ve dolayısıyla daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmesine imkan tanırken, baskı süresini önemli ölçüde artırmaktadır (Zhao, Wang & Zhang vd., 2019). Aynı zamanda, ince katman kalınlığı,

katmanlar arasında daha iyi bağlanmaya olanak vererek çekme ve eğme dayanımını artırmaktadır (Singh & Pandey vd., 2021). Örneğin Singh ve Pandey'in (2021) PLA ile yaptıkları deneysel çalışmada, 0.1 mm katman kalınlığının 0.3 mm'ye göre yaklaşık %15 daha yüksek çekme dayanımı sağladığı ve yüzey pürüzlülüğünün belirgin ölçüde azaldığı görülmüştür. Ancak, baskı süresinde ise %30'luk bir artış söz konusu olmuştur ki bu da üretim planlamasında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

### **2.7.2. İç Doluluk Oranı**

İç doluluk oranı, parçanın iç kısmının ne kadar dolu olduğunu gösterir ve bu oran mekanik dayanıklılığa doğrudan yansır (Tümer & Kaynak vd., 2019). Daha yüksek doluluk oranları, özellikle fonksiyonel parçalar için kritik öneme sahiptir; çünkü iç yapının sıklığı ve dolgunluğu, yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Literatürde, doluluk oranının %20'den %80'e çıkarılması durumunda çekme dayanımında yaklaşık %25'lik bir artış sağlandığı bildirilmiştir (Tümer & Kaynak vd., 2019). Ancak, yüksek doluluk oranları baskı süresini ve malzeme kullanımını önemli ölçüde artırarak ekonomik verimliliği düşürebilmektedir (Patel & Sharma vd., 2020). Bu nedenle, uygulamaya yönelik olarak optimal doluluk oranının seçilmesi gerekmektedir.

### **2.7.3. Kabuk Sayısı ve Kabuk Kalınlığı**

Kabuklar, baskının dış yüzeyini oluşturur ve katmanlar arasındaki yapısal sağlamlığı artırmak için önemlidir (Patel & Sharma vd., 2020). Kabuk sayısının artırılması, parçanın dış mukavemetini artırırken yüzey kalitesine olumlu etki yapabilir. Ancak kabuk sayısının aşırı artırılması, baskı süresini uzatmakta ve malzeme tüketimini artırmaktadır. Ayrıca, çok kalın kabuklar baskı sonrası işleme (törpüleme, zımparalama) süreçlerinde zorluk yaratabilmektedir (Patel & Sharma vd., 2020). Literatürde genellikle 2 ile 5 arasında kabuk sayısının ideal olduğu ve bunun dışındaki değerlerin işlevsellik ve üretim verimliliği açısından dezavantaj getirdiği vurgulanmaktadır.

#### **2.7.4. Ekstruder (Nozzle) Sıcaklığı**

Ekstruder sıcaklığı, filamentin doğru şekilde erimesi ve katmanların birbirine iyi yapışması için kritik bir parametredir (Rashid, Xie & Wysk vd., 2021). Optimum sıcaklık aralığının dışında, filament ya yeterince erimeyerek katmanlar arası zayıf bağ oluşturur ya da aşırı ısınarak malzemenin kimyasal yapısında bozulmalara yol açar. Örneğin PLA için ideal ekstruder sıcaklığı genellikle 190-210°C arasında değişirken, bu aralık dışında baskı kalitesinde %30'a varan azalma gözlemlenmiştir (Rashid vd., 2021). Ayrıca, ekstruder sıcaklığı aynı zamanda baskı yüzeyinin pürüzsüzlüğünü ve detayların netliğini de doğrudan etkiler.

#### **2.7.5. Baskı Hızı**

Baskı hızı, baskı süresi ve kalitesi açısından önemli bir denge unsurudur. Daha yüksek hızlarda baskı süresi kısalırken, yüzey kalitesi düşmekte ve katmanlar arası yapışma zayıflamaktadır (Lee, Kim & Lee vd., 2022). Lee vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, baskı hızının 30 mm/s'den 60 mm/s'ye çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğünde %18 artış gözlenmiş, bu da parçanın hem estetik hem de mekanik performansını olumsuz etkilemiştir. Karmaşık geometriler ve yüksek detay gerektiren parçalar için düşük hız tercih edilirken, prototip üretiminde hız öncelikli olabilmektedir.

### **2.8. FDM Baskı Parçalarının Mekanik ve Termal Analizleri**

FDM baskı parçalarının mekanik dayanıklılığı, baskı parametrelerinin yanı sıra kullanılan malzemenin yapısal özelliklerine ve termal davranışlarına bağlıdır (Gurralla & Regalla vd., 2020). Mekanik testlerde (çekme, eğme, darbe) parametrelerin etkileri detaylı şekilde incelenmiş, yüksek doluluk oranı ve uygun katman kalınlığının dayanıklılığı belirgin şekilde artırdığı tespit edilmiştir (Tümer & Kaynak vd., 2019). Termal analizler (DSC, TGA) aracılığıyla malzemenin kristalizasyon davranışı, cam geçiş sıcaklığı ve bozunma sıcaklıkları değerlendirilmiş, baskı sırasında uygulanan sıcaklıkların malzemenin termal kararlılığını etkilediği gösterilmiştir (Chen & Chen vd., 2020). Özellikle ekstruder sıcaklığının artması ile polimerin kristalizasyon derecesinin arttığı ve böylece termal dayanıklılığın iyileştiği bulunmuştur. Bu da FDM baskı parametrelerinin sadece mekanik değil, aynı zamanda termal performans üzerinde de kritik rol oynadığını göstermektedir.

## **2.9. Parametrelerin Çoklu Etkileşimleri ve Optimizasyon Çalışmaları**

Günümüzde, FDM baskı parametrelerinin birbirleri ile olan karmaşık etkileşimlerini anlamak ve baskı kalitesini en üst seviyeye çıkarmak amacıyla çok parametrelili optimizasyon yaklaşımları yaygınlaşmaktadır (Chen & Chen vd., 2020). Bu çalışmalar genellikle istatistiksel analizler, yapay zeka algoritmaları ve deneysel tasarım (DOE) yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Parametreler arasındaki sinerjik ve antagonistik etkilerin açığa çıkarılması, üretim süreçlerinin kontrolünü kolaylaştırmakta ve standartlaştırmaya katkı sağlamaktadır. Örneğin Chen & Chen vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, katman kalınlığı, doluluk oranı ve baskı hızı kombinasyonları incelenmiş, %80 doluluk oranı ile 0.1 mm katman kalınlığının birleşiminin çekme dayanımını %30 oranında artırdığı rapor edilmiştir. Ancak aynı kombinasyonun baskı süresini önemli ölçüde uzattığı da vurgulanmıştır.

## **2.10. Endüstriyel Uygulamalar ve Sürdürülebilirlik Perspektifi**

FDM teknolojisi, otomotivden medikale, havacılıktan eğitime kadar birçok alanda prototipleme, fonksiyonel parça üretimi ve özelleştirilmiş ürünlerin yapımında kullanılmaktadır (Ngo vd., 2018). Ancak, baskı parametrelerinin optimum belirlenmemesi durumunda üretim süreçlerinde zaman, malzeme ve enerji israfı yaşanmakta, bu da hem ekonomik hem de çevresel açıdan olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Rashid vd., 2021). Bu nedenle, literatürde sürdürülebilir üretim için baskı parametrelerinin optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmakta, çevresel etkilerin azaltılması ve atıkların minimize edilmesine yönelik çalışmalar artmaktadır. Doğru parametre seçimi, sadece baskı kalitesini değil, aynı zamanda enerji tüketimi ve malzeme kullanımı gibi sürdürülebilirlik kriterlerini de olumlu yönde etkilemektedir (Rashid vd., 2021).

## **2.11.FDM Teknolojisinde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri**

FDM teknolojisinde filament olarak kullanılan termoplastikler, baskı kalitesi ve parçanın mekanik performansı açısından büyük öneme sahiptir. En yaygın filamentler ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), PLA (Polilaktik Asit), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) olarak sıralanabilir. ABS, yüksek darbe dayanımı, termal stabilite ve kimyasal direnç sağlarken, baskı sırasında warping eğilimi nedeniyle ısıtılmalı tabla gerektirir. PLA ise biyolojik olarak parçalanabilir, düşük erime sıcaklığına sahip ve kolay işlenebilir olması sebebiyle eğitim ve prototipleme amaçlı tercih edilir (Turner vd., 2014). PETG, ABS ve PLA arasında mekanik dayanım ve işlenebilirlik açısından denge sağlayan bir filamenttir. Nylon (PA), TPU (Termoplastik Poliüretan) gibi esnek filamentler ise esnek ve dayanıklı parçaların üretiminde kullanılır. Daha

yüksek performans gerektiren uygulamalarda ise PEEK, Ultem gibi mühendislik termoplastikleri tercih edilir; bu malzemeler yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım sunar ancak baskı için özel donanım gerektirir (Ngo vd., 2018). Filament çapları genellikle 1.75 mm ve 2.85 mm olarak standartlaşmıştır. Filamentin nem emme kapasitesi, baskı kalitesini etkileyen önemli bir faktördür; nemli filamentlerde basınç artar ve baskı yüzeyinde kusurlar oluşabilir. Bu nedenle filamentlerin uygun koşullarda saklanması ve gerekirse kurutulması gerekir.

### **2.11.1. ABS Malzemenin Özellikleri ve FDM'deki Önemi**

ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) termoplastik polimeri, FDM teknolojisinde en yaygın kullanılan filamentlerden biridir. Mekanik dayanıklılığı, ısı direnci ve kimyasal stabilitesi ile prototipleme ve fonksiyonel parça üretiminde tercih edilir (Chacón vd., 2017). ABS'nin cam geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) yaklaşık  $105^{\circ}\text{C}$  olup, bu sıcaklık üstünde malzeme daha esnek hale gelir. Bu özellik, baskı sırasında parçanın yüksek sıcaklıklara dayanabilmesini sağlar, ancak aynı zamanda baskı sonrası büzülme ve deformasyon risklerini artırır (Ahn vd., 2002). ABS'nin viskoelastik davranışı, termal genleşme katsayısı ve kristal yapısı, katmanlar arasındaki yapışma kalitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle, baskı parametreleri dikkatle optimize edilmezse, katmanlar arasında zayıf bağ oluşabilir ve parçanın mekanik dayanımı azalabilir. Aynı zamanda ABS filamentin nem absorpsiyonu da baskı kalitesinde düşüşe sebep olur; nemli filamentler, baskıda kabarcıklar oluşturarak yüzey kalitesini bozar.

### **2.11.2. FDM Prosesinde ABS Kullanımına Özgü Zorluklar**

ABS filament ile FDM baskı yapılırken karşılaşılan en önemli problemlerden biri warping (büzülme) ve çatlamadır. Büzülme, ABS'nin soğurken hacim küçültmesinden kaynaklanır ve bu da özellikle geniş tabanlı ve ince parçalar için şekil bozulmasına yol açar (Sood vd., 2010). Bu sorunun önüne geçmek için tabla sıcaklığı genellikle  $90-110^{\circ}\text{C}$  arasında tutulur ve baskı ortamının kapalı, kontrollü sıcaklıklı olması tercih edilir. Diğer bir zorluk ise ABS'nin solvent bazlı yüzey işlemlerine uygun olmasıdır. ABS parçalar, asetonda pürüzsüzleştirilebilir; ancak bu işlem parçanın mekanik özelliklerini değiştirebilir. Ayrıca, ABS'nin yanıcı ve toksik gazlar yayabilmesi sebebiyle, kapalı ve iyi havalandırılmış baskı ortamları gereklidir.

### **2.11.3. ABS'nin Mekanik ve Termal Özellikleri**

ABS, yüksek darbe dayanımı ve çekme mukavemeti ile dikkat çeker. Literatürde ABS parçaların çekme dayanımı genellikle 30-50 MPa arasında rapor edilmiştir (Popescu vd., 2018). Elastik modülü yaklaşık 1.5-2 GPa civarındadır. FDM baskıda bu değerler, katman kalınlığı,

baskı yönü ve diğer parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Termal olarak, ABS'nin yüksek Tg değeri sayesinde ısıya karşı dayanıklı olması, prototip ve fonksiyonel parçalar için avantaj sağlar. Ancak baskı sırasında nozzle sıcaklığının 230-250°C arasında optimum seviyede tutulması gerekir; düşük sıcaklıkta katmanlar arası yapışma zayıf, yüksek sıcaklıkta ise filament bozunabilir.

#### **2.11.4. FDM Baskı Parametrelerinin ABS Üzerindeki Etkileri**

ABS ile FDM baskıda en kritik parametreler arasında nozzle sıcaklığı, tabla sıcaklığı, katman kalınlığı, baskı hızı ve doluluk oranı yer almaktadır. Nozzle sıcaklığı, katmanlar arası yapışmayı ve filamentin akışkanlığını belirlerken, tabla sıcaklığı warping (çekme) sorununu azaltmada önemli bir rol oynar. Katman kalınlığı ise yüzey kalitesini ve baskı süresini etkiler; ince katmanlar daha iyi yüzey kalitesi sağlasa da baskı süresini uzatır. Baskı hızı mekanik özellikleri doğrudan etkiler; çok yüksek hızlarda katman yapışması zayıflayabilir. Doluluk oranı ise parçanın iç doluluğunu, mekanik dayanımını ve ağırlığını belirler. Bu parametrelerin doğru kombinasyonu, baskı kalitesi ve parçanın dayanıklılığını maksimize eder. Literatürde çoğunlukla tek parametre analizleri bulunmakla birlikte, parametreler arasındaki etkileşimlerin çok değişkenli analizi henüz tam anlamıyla yapılmamıştır.

#### **2.12. FDM Teknolojisinde Literatür Özeti ve Boşluklar**

Fused Deposition Modeling (FDM), katmanlı imalat teknolojileri arasında kolay erişilebilirliği ve düşük maliyeti sayesinde hem akademik hem de endüstriyel alanda yoğun şekilde araştırılan bir üretim yöntemi olmuştur. İlk ticari FDM cihazları 1990'ların başında Stratasys tarafından geliştirdikten sonra, teknolojiye gelişmeler ve filament malzeme çeşitliliğindeki artışa, bu yöntemin uygulama alanlarını hızla genişletmiştir (Turner, Strong & Gold vd., 2014). Literatürde FDM ile ilgili çalışmalar, genellikle baskı parametrelerinin mekanik performans, yüzey kalitesi ve üretim verimliliğine etkisi üzerine yoğunlaşmaktadır. Ayrıca malzeme geliştirme, modelleme teknikleri, proses optimizasyonu ve sürdürülebilirlik konuları da giderek artan bir şekilde ele alınmaktadır. Ancak bu alandaki birçok çalışma sınırlı parametre setleri ve spesifik filamentlerle yapılmakta, geniş kapsamlı, çok parametrelili ve gerçek üretim koşullarına yakın modelleme çalışmaları sınırlı kalmaktadır.

##### **2.12.1 FDM Parametrelerinin Mekanik Performansa Etkisi**

FDM parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi literatürde detaylıca incelenmiştir. Örneğin, Ahn vd. (2002) ABS malzemesi üzerinde yaptıkları çalışmada, baskı yönünün (build

orientation) parçanın çekme dayanımı üzerinde %40'a varan farklılıklara neden olduğunu göstermiştir. Katman kalınlığı, baskı hızı, nozzle sıcaklığı gibi parametreler ise parçanın iç yapısını ve katmanlar arası yapışmayı etkileyerek mekanik dayanımı doğrudan belirlemektedir (Popescu vd., 2018). Ancak, bu çalışmalar genellikle tek bir parametreyi sabit tutup diğerini değiştirerek sınırlı deneysel veriler sunmaktadır. Parametrelerin karşılıklı etkileşimlerinin çok değişkenli modellerle incelenmesi literatürde henüz tam olarak karşılanmamış bir boşluktur.

### **2.12.2. Malzeme Gelişmeleri ve Yeni Filament Türleri**

FDM teknolojisinin gelişimi sadece proses parametreleri ile sınırlı kalmamış, filament malzeme çeşitliliğinde de önemli ilerlemeler yaşanmıştır. Standart ABS ve PLA'nın yanında, karbon fiber takviyeli kompozitler, naylon, esnek TPU ve hatta metal dolgu filamentler piyasaya sürülmüştür (Kumar vd., 2020). Bu yeni filamentlerin baskı parametrelerine adaptasyonu ve mekanik performans analizleri literatürde hızla artan bir araştırma konusu olmuştur. Örneğin karbon fiber takviyeli filamentlerin katmanlar arası yapışmayı zorlaştırdığı ve buna bağlı olarak mekanik dayanımda düşüş yaşandığı rapor edilmiştir. Ayrıca, yeni filament türlerinin termal özellikleri ve baskı sürecindeki stabiliteleri hakkında standart referanslar halen yetersizdir. Bu da proses optimizasyonunu zorlaştıran önemli bir araştırma boşluğu olarak görülmektedir.

### **2.12.3. Mikrostruktur ve Katmanlar Arası Yapışma**

Parçaların mekanik performansını etkileyen en kritik faktörlerden biri, katmanlar arası yapışma kalitesidir. Literatürde bu konu üzerine yapılan çalışmalar nispeten sınırlı olup, genellikle SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) ve termal analiz teknikleriyle katman sınırlarının incelenmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir (Singh & Singh vd., 2017). Katmanlar arasındaki zayıf yapışma, özellikle çekme ve darbe dayanımını olumsuz etkiler. Ancak katman yapışmasının, proses parametrelerinin yanı sıra filament özellikleri, baskı ortamı sıcaklığı ve soğutma şartlarıyla da yakından ilişkili olduğu anlaşılmıştır. Bu alandaki araştırmalar, parçaların mikro yapısı ile makro mekanik özellikleri arasında bağlantı kurmaya çalışmakta ancak heterojen yapı nedeniyle genelleme yapmak zorlaşmaktadır. Literatürde bu konuda standart test metotları ve modeller hâlen gelişmektedir.

### **2.12.4 Proses Optimizasyonu ve Modelleme Yaklaşımları**

Deneysel çalışmaların zaman ve maliyet açısından sınırlı olması sebebiyle, proses parametrelerinin optimizasyonu için sayısal modelleme ve yapay zeka tabanlı teknikler giderek önem kazanmıştır. Wang vd. (2019) tarafından yapılan derlemede Taguchi yöntemi, genetik

algoritmalar ve yapay sinir ağıları gibi optimizasyon tekniklerinin FDM süreç parametreleri için kullanıldığı vurgulanmıştır. Ancak bu yöntemlerin genel bir zorluğu, modelin doğruluğunun eğitim verisinin kalitesine ve kapsamına bağlı olmasıdır. Ayrıca birçok model, idealize edilmiş koşullarda ve sınırlı parametre setiyle çalışmakta olup, gerçek üretim ortamındaki değişkenlikleri tam olarak yansıtamamaktadır. Çok parametrelili ve gerçek zamanlı optimizasyon sistemlerinin geliştirilmesi literatürde önemli bir araştırma boşluğudur.

#### **2.12.5. Endüstriyel Uygulamalar ve Sürdürülebilirlik**

FDM teknolojisi, başlangıçta prototipleme amacıyla kullanılırken, günümüzde işlevsel parçaların üretiminde de yaygınlaşmıştır (Ngo vd., 2018). Havacılık, otomotiv, medikal ve tüketici ürünleri gibi sektörlerde FDM'nin uygulanabilirliği artmasına rağmen, üretim hızı, malzeme dayanımı ve yüzey kalitesi gibi alanlarda hâlâ iyileştirme gerekmektedir. Sürdürülebilirlik açısından filament geri dönüşümü, üretim atıklarının azaltılması ve enerji verimliliği konuları literatürde artan bir ilgi görmekle birlikte henüz tam anlamıyla oturmuş değildir. Özellikle geri dönüştürülmüş filamentlerin mekanik özellikleri ve baskı performansları üzerine yapılan sistematik çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca, endüstriyel FDM sistemlerinde atık ve enerji yönetimi için standart protokollerin geliştirilmesi gerekmektedir. Parametreler arası karmaşık etkileşimlerin incelenmesi hâlen eksiktir; çoğu çalışma yalnızca tek bir parametre ya da sınırlı etkileşimleri ele almaktadır. Yeni malzemelerin, özellikle karbon fiber takviyeli ve esnek filamentlerin, proses uyumuna yönelik standartlar ve kapsamlı deneysel veriler oldukça azdır. Mikro yapı ile makro mekanik performans arasındaki ilişkiyi inceleyen modelleme çalışmaları ve standart test metodları da sınırlı sayıdadır. Gelişmiş optimizasyon ve gerçek zamanlı kontrol sistemleri, yapay zeka tabanlı çok parametrelili ve dinamik yaklaşımlar hâlâ araştırılmaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler bağlamında filament geri dönüşümü, enerji tüketimi ve atık yönetimi üzerine sistematik çalışmalar ve standartlar henüz oluşturulmamıştır. Literatürde FDM teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar, temel proses parametreleri ve malzeme özelliklerinin baskı kalitesine etkisi konusunda önemli bilgiler sunsa da, çok parametrelili sistemlerin bütüncül optimizasyonu, yeni malzemelerin proses adaptasyonu ve sürdürülebilirlik alanlarında önemli eksiklikler bulunmaktadır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM VE MATERYAL

Bu tez çalışmasında, Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisi kullanılarak termoplastik malzemelerden üretilen parçaların, üretim sürecinde kritik öneme sahip parametrelerin mekanik ve yapısal performans üzerindeki etkileri deneysel yöntemler aracılığıyla kapsamlı şekilde incelenmiştir. Deneysel süreç; malzeme seçimi ve karakterizasyonu, numune tasarımı, parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesi, üretim ve sonrasında uygulanan mekanik, termal ve mikroyapısal testler ile performans analizlerini içermektedir. Bu kapsamda, baskı sıcaklığı, katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı ve baskı yönü gibi süreç değişkenlerinin, parçaların çekme mukavemeti, eğilme dayanımı, darbe tokluğu ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak ele alınmıştır. Deneysel tasarım süreci, literatürde yaygın olarak kullanılan deney tasarım teknikleri (örneğin Taguchi metodu, faktöriyel deney tasarımı) esas alınarak oluşturulmuş, bu sayede parametrelerin tek başına ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin etkileri istatistiksel yöntemlerle ortaya konmuştur (Sood, Ohdar & Mahapatra, 2010; Torres vd., 2015). Bu yaklaşım, deneysel verilerin güvenilirliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim parametrelerinin optimizasyonuna yönelik sistematik bir yol haritası sunmaktadır. Ayrıca, üretilen parçaların mikro yapısal kalitesi ve termal stabilitesi, sırasıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) gibi ileri karakterizasyon teknikleri ile desteklenmiştir.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojisi ile 3D baskı yöntemi kullanılarak deneysel numuneler, yalnızca Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) termoplastik malzemeden üretilmiştir. ABS, yüksek darbe dayanımı, iyi ısıl stabilite ve termal direnci sayesinde FDM baskıda yaygın olarak tercih edilen bir filament türüdür (Turner, Strong & Gold vd., 2014). ABS malzemesi, özellikle mekanik performansın kritik olduğu uygulamalarda sağlamlık ve dayanıklılık açısından avantajlar sunmakla birlikte, baskı sırasında yaşanabilen büzülme ve warping (şekil bozulmaları) sorunları nedeniyle proses parametrelerinin dikkatli yönetilmesini gerektirir.

### 3.1.1. ABS Malzemesinin Temel Özellikleri

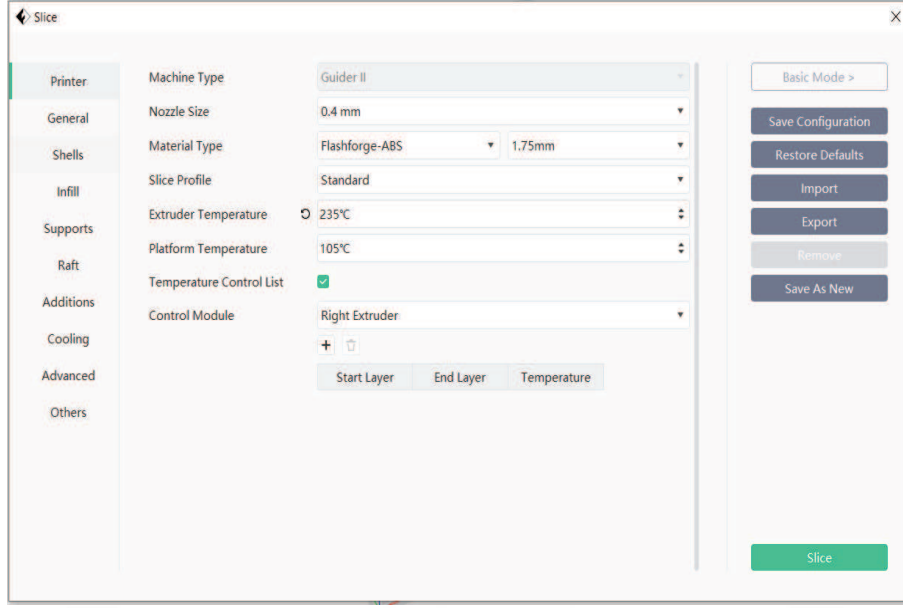
ABS, amorf yapıda termoplastik bir kopolimer olup, akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinin belirli oranlarda kopolimerizasyonu ile elde edilir (Callister & Rethwisch vd., 2018). Bu yapı, malzemeye darbe dayanımı ve termal kararlılık gibi önemli mekanik özellikler kazandırır. ABS'nin tipik özellikleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.1** ABS'nin Tipik Özellikleri

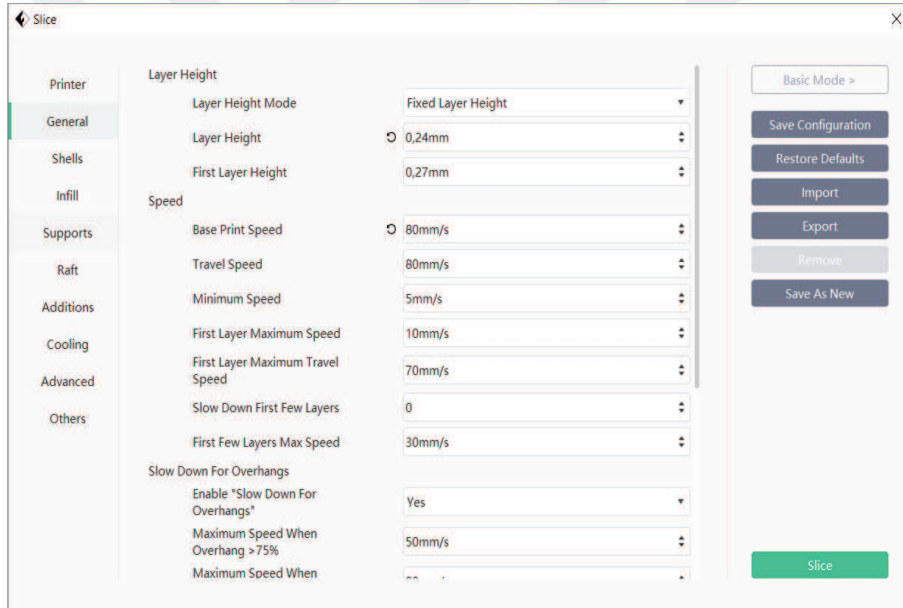
| Özellik             | Değer   | Birim             |
|---------------------|---------|-------------------|
| Erime Sıcaklığı     | 220–250 | °C                |
| Yoğunluk            | 1.04    | g/cm <sup>3</sup> |
| Çekme Mukavemeti    | 40–50   | MPa               |
| Elastik Modül       | 1.8–2.5 | GPa               |
| Cam Geçiş Sıcaklığı | 105     | °C                |

### 3.1.2. Yazıcı ve Yazılım Detayları

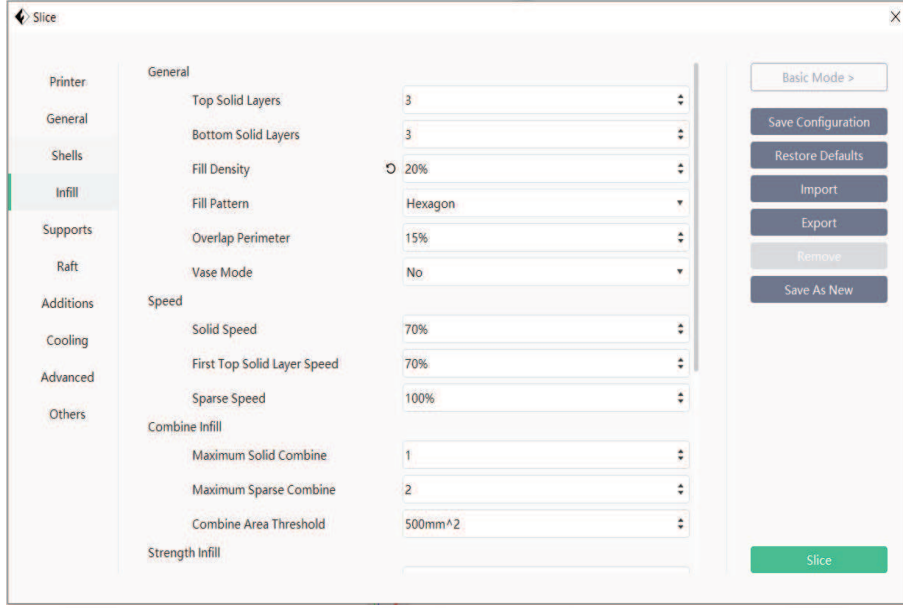
Bu çalışmada, deneysel numunelerin üretimi için FlashPrint 5 yazılımı destekli FlashForge Guider 2 FDM 3D yazıcı kullanılmıştır. FlashForge Guider 2, çift nozullu, kapalı yapıya sahip ve endüstriyel düzeyde mekanik performans sunan bir FDM yazıcı modelidir. Bu yazıcı, ABS gibi termoplastik filamentlerin yüksek hassasiyetle işlenebilmesine olanak tanımaktadır (FlashForge, 2020). Numune tasarımlarının STL formatında hazırlanmasının ardından, baskı işlemi FlashPrint 5 dilimleme yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. FlashPrint 5, kullanıcı dostu arayüzü ve gelişmiş parametre kontrolü ile baskı süreçlerinin hassas yönetimini sağlar. Bu yazılım üzerinden katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı hızı, destek yapıları ve tabla yapışması gibi parametreler detaylı biçimde tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında katman kalınlığı 0.1–0.3 mm aralığında değiştirilmiş, doluluk oranı ise %20 ile %100 arasında ayarlanarak malzeme tüketimi ve parça dayanımı üzerindeki etkiler incelenmiştir. Ayrıca destek ve raft yapıları, karmaşık geometrilerde parça deformasyonlarını engellemek amacıyla uygun şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.1., Şekil 3.2. ve 3.3.’de FlashPrint 5 yazılımına ait arayüzde çeşitli özelliklerin seçimi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. FlashForge 3D Arayüz Ekranında Extruder Temperature Ayarı

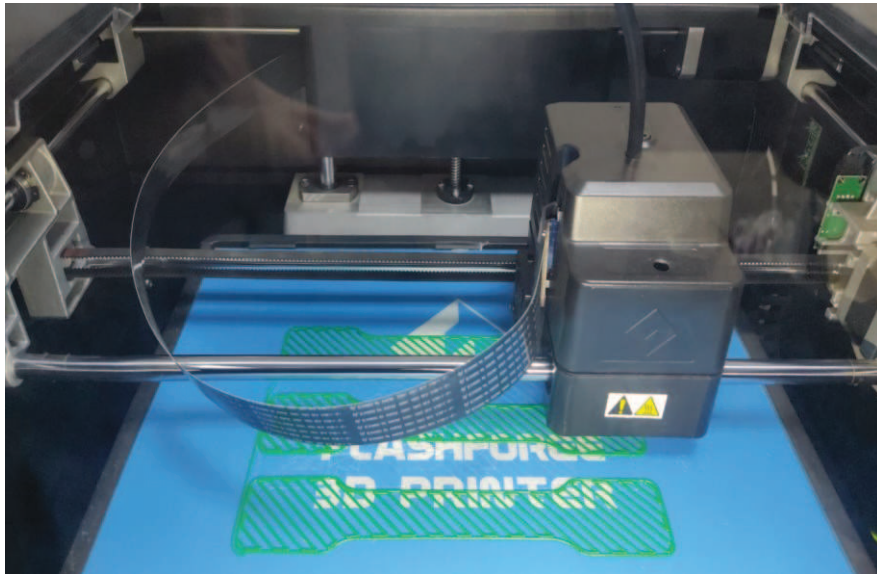


Şekil 3.2. FlashForge 3D Arayüz Ekranında Layer Height ve Base Print Speed Ayarı

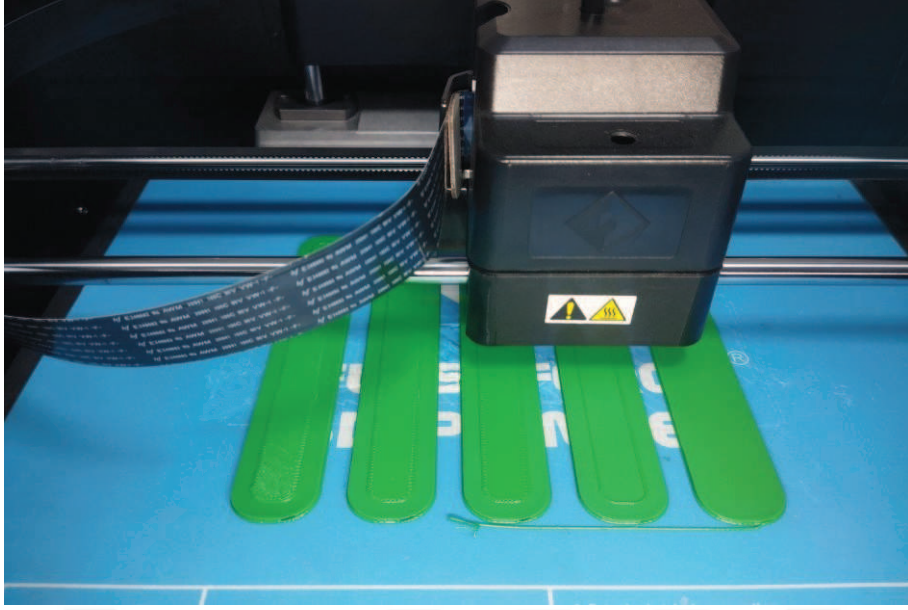


**Şekil 3.3.** FlashForge 3D Arayüz Ekranında Fill Density Ayarı

FlashForge Guider 2, 225×145×150 mm baskı hacmine sahiptir ve 0.4 mm standart nozula sahip olmakla birlikte, farklı nozullar kullanılarak katman kalınlığı ve baskı detayları optimize edilebilir. Yazıcının ısıtmalı tabla sıcaklığı 100°C'ye kadar kontrol edilebilirken, nozul sıcaklığı 230–260°C aralığında ayarlanabilmektedir. Ayrıca kapalı baskı kabini sayesinde ABS baskılarında warping gibi deformasyonların azaltılması sağlanmaktadır (FlashForge vd., 2020). Yazıcı, filament besleme sistemi olarak tek veya çift ekstrüder opsiyonu sunmakta olup, bu çalışmada ABS filamentlerin kaliteli ve sürekli beslenmesi için çift ekstrüder modu tercih edilmiştir. Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'de çekme numunesinin üretim aşamasından bir kesit bulunmaktadır.



**Şekil 3.4.** FlashForge Guider 2 ile Çekme Numunesinin Üretim Aşaması



**Şekil 3.5.** FlashForge Guider 2 ile Darbe Numunesinin Üretim Aşaması

### **3.1.3 Baskı Sürecinin Kontrolü ve Kalibrasyonu**

Baskı öncesinde yazıcı nozul ve tabla kalibrasyonu yapılmış, tabla yüzeyinin düzlüğü ve nozulların hizalanması titizlikle kontrol edilmiştir. Her baskı öncesinde filamentin nem durumu ve çapı ölçülerek baskı kalitesinde tutarlılık sağlanmıştır (Gibson, Rosen & Stucker vd., 2021). Baskı sırasında sıcaklık, hız ve ekstrüzyon oranları gibi kritik parametreler izlenmiş ve olası hataların önüne geçilmiştir. Bu süreçte FlashPrint 5 yazılımının ön izleme ve hata tespit araçları kullanılarak baskı kalitesi üst düzeyde tutulmuştur. Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemiyle ABS malzemeden üretilen parçaların performansını belirleyen en kritik faktörler, üretim sürecinde seçilen parametrelerin dikkatli biçimde ayarlanması ve kontrolüdür. Bu parametrelerin optimizasyonu, parça kalitesi, mekanik dayanıklılık, yüzey pürüzlülüğü ve üretim verimliliği açısından belirleyici olmaktadır. Bu çalışmada baskı sıcaklığı, katman kalınlığı, baskı hızı ve doluluk oranı gibi dört temel süreç parametresi sistematik olarak incelenmiş, deneysel tasarım yoluyla bu parametrelerin tekil ve etkileşim etkileri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Baskı sıcaklığı, ABS filamentin ekstrüzyon sırasında erime ve akışkanlık özelliklerini doğrudan etkileyerek katmanlar arası bağlanmanın kalitesini belirler. Çalışmada 235°C, 245°C ve 255°C sıcaklık değerleri seçilmiştir. Literatürde belirtildiği gibi (Sood, Ohdar & Mahapatra vd., 2010), optimum baskı sıcaklığı katmanlar arasında güçlü yapışma sağlarken, çok yüksek sıcaklıklar filamentin termal bozunmasına ve mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilir. Düşük sıcaklıkta ise katmanlar arasında zayıf adezyon oluşarak parça mukavemeti olumsuz etkilenir (Turner, Strong & Gold vd., 2014). Katman kalınlığı, baskı çözünürlüğü ve yüzey kalitesini belirleyen önemli bir

parametredir. 0.18 mm, 0.24 mm ve 0.36 mm olmak üzere üç farklı kalınlık test edilmiştir. İnce katmanlar daha detaylı ve pürüzsüz yüzey sağlar, ancak baskı süresini artırır. Kalın katmanlar baskı hızını yükseltir, ancak yüzeyde katman çizgileri belirginleşir ve mekanik dayanıklılıkta değişikliklere yol açabilir (Torres vd., 2015). Katman kalınlığının mekanik dayanım üzerindeki etkisi, özellikle çekme ve eğilme mukavemeti gibi performans kriterlerinde önemli farklar yaratır. Baskı hızı, üretim süresini optimize etmek için kritik bir parametredir. Nozul ve tabla kalibrasyonu her baskıdan önce otomatik ve manuel olarak yapılmış, tabla düzlüğü ve nozul mesafesi dijital kalibrasyon kartı ile doğrulanmıştır. Filamentler ise 60°C’de 6 saat kurutularak nem kaynaklı mikro kabarcık ve yüzey kusurları engellenmiştir (Wang vd., 2018). Baskı ortamı kapalı kabin kullanılarak sıcaklık dalgalanmaları minimize edilmiş, tabla sıcaklığı sabit 100°C’de tutulmuştur. Her baskı sonrası dijital kumpasla ölçüm yapılarak standart dışı boyut farkları tespit edilen numuneler test dışı bırakılmıştır. Mekanik testlerde karşılaştırılabilir ve standartlaştırılmış sonuçlar elde etmek için üç farklı test türü ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Baskı hızları 40 mm/s, 60 mm/s ve 80 mm/s olarak denenmiştir. Baskı hızı arttıkça üretim süresi azalır, ancak yüksek hızlarda ekstrüzyon düzensizleşir, katmanlar arası yapışma kalitesi düşer ve yüzey kusurları artar (Turner, Strong & Gold vd., 2014). Bu nedenle baskı hızı, endüstriyel üretimde hız ve kalite arasında optimal dengeyi sağlamak üzere dikkatle ayarlanmalıdır. Doluluk oranı, parçanın iç yapısının yoğunluğunu ifade eder ve %20, %50 ile %100 doluluk seviyeleri incelenmiştir. Yüksek doluluk oranı parçanın dayanıklılığını ve ağırlığını artırırken, malzeme kullanımı ve baskı süresini de uzatır (Gibson, Rosen & Stucker vd., 2021). Düşük doluluk ise ağırlık ve maliyet avantajı sağlamakla birlikte mekanik performansta düşüslere yol açabilir. Farklı doluluk seviyelerinin incelenmesi, uygulamaya yönelik performans ve maliyet analizleri için önemlidir.

### **3.2. Deneysel Yöntem**

Çalışmada, toplam 9 farklı proses parametre kombinasyonu belirlenmiş ve her bir kombinasyon için 5 adet baskı numunesi üretilmiştir. Böylece, deneysel analizlerde kullanılmak üzere toplamda 45 numune hazırlanmıştır. Bu yaklaşım, proses parametrelerinin mekanik ve yapısal performans üzerindeki etkilerinin tekrarlanabilir ve güvenilir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır. Elde edilen deneysel veriler, parametrik ve istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Özellikle varyans analizi (ANOVA) ile baskı parametrelerinin numune özellikleri üzerindeki anlamlı etkileri belirlenmiş, bu sayede hangi parametrelerin mekanik dayanım ve baskı kalitesi üzerinde kritik rol oynadığı ortaya

konmuştur. Ayrıca parametrik regresyon modelleri kullanılarak proses parametreleri ile performans kriterleri arasındaki ilişki nicel olarak ifade edilmiştir (Montgomery vd., 2017). Tablo 3.2.'de proses parametreleri tablosu gösterilmiştir.

**Tablo 3.2.** Proses Parametreleri Tablosu

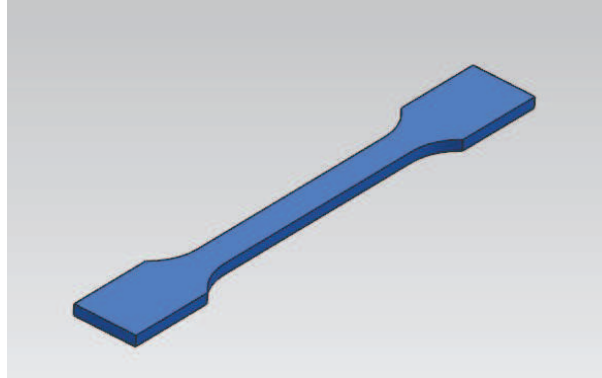
| Numune Numarası | Numune Kodu  | Extruder Sıcaklığı (°C) | Tabaka Yüksekliği (mm) | Baskı Hızı (mm/s) | Doluluk Yoğunluğu (%) |
|-----------------|--------------|-------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| 1               | T235S40F20   | 235                     | 0.18                   | 40                | 20                    |
| 2               | T235S60F20   | 235                     | 0.18                   | 60                | 20                    |
| 3               | T235S80F20   | 235                     | 0.18                   | 80                | 20                    |
| 4               | T235L0.24F20 | 235                     | 0.24                   | 80                | 20                    |
| 5               | T235L0.24F50 | 235                     | 0.24                   | 80                | 50                    |
| 6               | T235S80F100  | 235                     | 0.24                   | 80                | 100                   |
| 7               | T235L0.36F20 | 235                     | 0.36                   | 80                | 20                    |
| 8               | T245S80F20   | 245                     | 0.36                   | 80                | 20                    |
| 9               | T255S80F20   | 255                     | 0.36                   | 80                | 20                    |

### 3.2.1. Üretim Süreci ve Karakterizasyon

Üretim sürecinin tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla aşağıdaki kalite kontrol protokolleri uygulanmıştır:

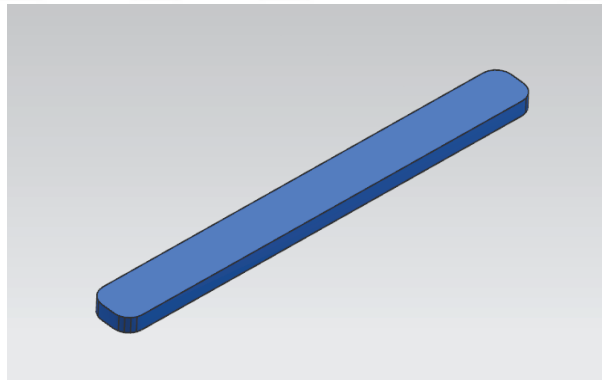
**Çekme Testi (ASTM D638):** ABS malzemesi için uygun olan Type I geometrisinde numuneler tasarlanmıştır. Numune yaklaşık 170 mm uzunluğa, 23 mm genişliğe ve 4 mm kalınlığa sahiptir. Numunenin uç kısımları geniş ve ortası daralmış yapıda olup, kırılmanın

belirli bir noktada meydana gelmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.6.'da Siemens Nx CAD programı ile tasarımı yapılan çekme testi numunesi gösterilmektedir.



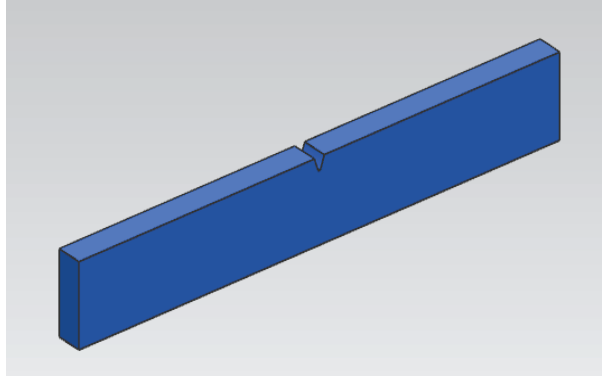
**Şekil 3.6.** Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Çekme Testi Numunesi

**Eğme Testi (ASTM D790):** Üç nokta eğilme testi için önerilen  $127 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  boyutlarında dikdörtgen prizma şekilli numuneler modellenmiştir. Numuneler, eğme test düzeneğinde burkulma veya burulmaya maruz kalmadan yalnızca eğilme kuvveti altında test edilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.7.'de Siemens Nx CAD programı ile tasarımı yapılan eğme testi numunesi gösterilmektedir.



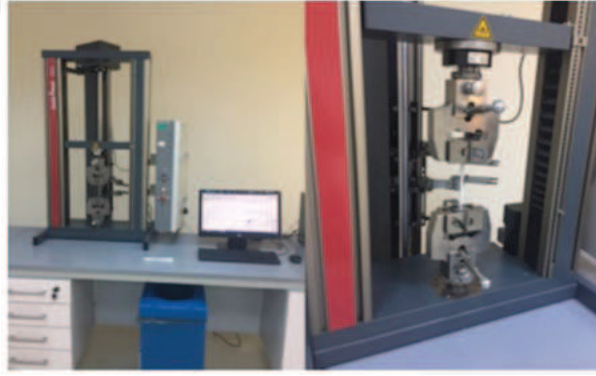
**Şekil 3.7.** Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Eğme Testi Numunesi

**Darbe Testi (ASTM D256):** Darbe dayanımı ölçümünde kullanılan çentikli Charpy darbe test numuneleri 80 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında hazırlanmıştır. Çentik açısı, derinliği ve konumu standartlara uygun biçimde modellenmiştir. Şekil 3.8.'de Siemens Nx CAD programı ile tasarımı yapılan darbe testi numunesi gösterilmektedir.



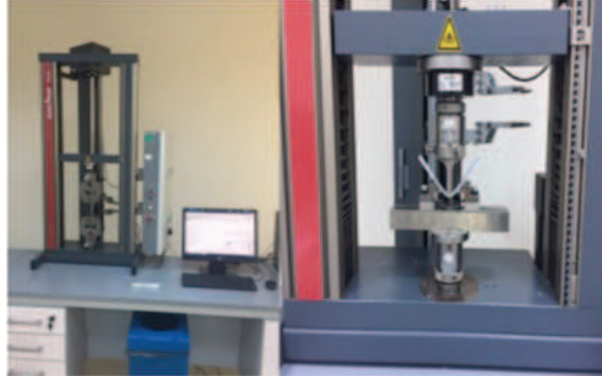
**Şekil 3.8.** Siemens Nx CAD Programı ile Tasarımı Yapılan Darbe Testi Numunesi

Çekme Testi (ASTM D638) bir malzemenin uzama, akma ve kopma davranışlarını ortaya koymak amacıyla uygulanan standart bir testtir. ABS gibi termoplastik polimerler, özellikle katmanlı üretim sürecinden sonra anizotropik mekanik özellikler gösterebilir. Bu testle, çekme dayanımı ( $\sigma_{max}$ ), kopma uzaması ( $\% \epsilon$ ) ve Young modülü (E) gibi temel parametreler belirlenir. FDM parçalarında bu parametreler, katman yönelimi ve ekstrüzyon kalitesi gibi baskıya özgü faktörlerden ciddi biçimde etkilenir. Şekil 3.9.'da Çekme Test Uygulaması gösterilmektedir.



**Şekil 3.9.** Çekme Test Uygulaması

Eğme Testi (ASTM D790) parçanın eğilme dayanımı ( $\sigma_f$ ), elastik eğilme modülü ve deformasyon altındaki yapısal bütünlüğünü analiz etmeye yarar. FDM yöntemi ile üretilen ABS numunelerde, katmanlar arası bağın kalitesi ve doluluk yapısı eğilme direnci üzerinde doğrudan belirleyicidir. Şekil 3.10.'da Eğme Test Uygulamasına ait fotoğraf gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** Eğme Test Uygulaması

Darbe Testi (ASTM D256) özellikle dış yükleme altında ani zorlamalara maruz kalacak parçalar için oldukça önemlidir. FDM süreci, katmanlar arasında yapışma zayıflığına yol açabileceği için darbe dayanımı yönünden hassastır. ABS malzemenin bu testle viskoelastik özellikleri ve enerji absorpsiyon kapasitesi ölçülmüştür. Şekil 3.11.'de Darbe Test Cihazı gösterilmektedir.



**Şekil 3.11.** Darbe Test Cihazı

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Çekme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çekme testi sonuçları, özellikle baskı sıcaklığının ve katman kalınlığının çekme mukavemeti üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymuştur. T245S80F20 numunesi 115.55 MPa maksimum çekme dayanımı ve 6322.55 MPa elastik modül ile en yüksek performansı sergilemiştir. Bu numunenin 245°C baskı sıcaklığı ve %80 doluluk oranı ile üretilmiş olması, sıcaklık artışının katmanlar arası difüzyonu güçlendirerek bağ kalitesini artırdığını göstermektedir (Ahn vd., 2002). Katman kalınlığı 0.36 mm olan T235L0.36F20 örneğinde de yüksek elastik modül (6064.30 MPa) ve çekme dayanımı (110.64 MPa) gözlenmiştir. Bu, daha az katman sayısına bağlı olarak katmanlar arası hataların azaltılabileceğini ve bu sayede mukavemetin artabileceğini göstermektedir (Sood vd., 2010). Tersine, T235S80F100 örneği, %100 doluluk oranına rağmen 32.95 MPa çekme dayanımı ile en düşük performansı sergilemiştir. Bu düşüş, 100 mm/s gibi yüksek baskı hızının, katmanlar arasında yeterli ısı yapışmanın gerçekleşmemesine neden olabileceğini düşündürmektedir (Chacon vd., 2017).

### 4.2. Eğme Testi Sonuçları ve Yorumları

Eğme testleri de benzer parametre etkilerini göstermiştir. T245S80F20 ve T255S80F20 numuneleri, sırasıyla 62.60 MPa ve 61.24 MPa eğme dayanımları ile öne çıkmıştır. Bu numunelerin yüksek baskı sıcaklıkları, eğilme sırasında oluşabilecek çatlakların ilerlemesini geciktirerek daha dayanıklı bir yapı kazandırmıştır (Lee et vd., 2007). T235L0.36F20 numunesi 2151.86 MPa gibi yüksek bir eğilme modülü sunmuştur. Bu sonuç, kalın katmanların oluşturduğu rijit iç yapının yük taşıma kapasitesini artırdığını ve mekanik rijitliği güçlendirdiğini göstermektedir. Düşük baskı sıcaklığı ve ince katmanlı yapı ile üretilen numunelerde ise, eğilme dayanımı ve modül değerlerinde görece bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum, düşük sıcaklığın yeterli erime ve bağlanmayı sağlamamasından kaynaklanmaktadır.

### 4.3. Darbe Testi Performansı ve Parametrik Analiz

Charpy darbe testi sonuçları, malzemelerin ani yüklemeler altındaki davranışlarını değerlendirmek açısından önemli bilgiler sunmuştur. T245S80F20 numunesi, çentiksiz testte 158.81 kJ/m<sup>2</sup>, çentikli testte ise 129.14 kJ/m<sup>2</sup> darbe dayanımı göstererek en yüksek değerleri sunmuştur. Bu, yüksek sıcaklık sayesinde katmanlar arası yapışmanın daha homojen hale gelmesiyle açıklanabilir (Ziemian vd., 2012). Öte yandan, T235L0.24F50 numunesi, %50 doluluk oranına rağmen düşük sıcaklıkta üretildiği için çentikli darbe testinde yalnızca 52.88

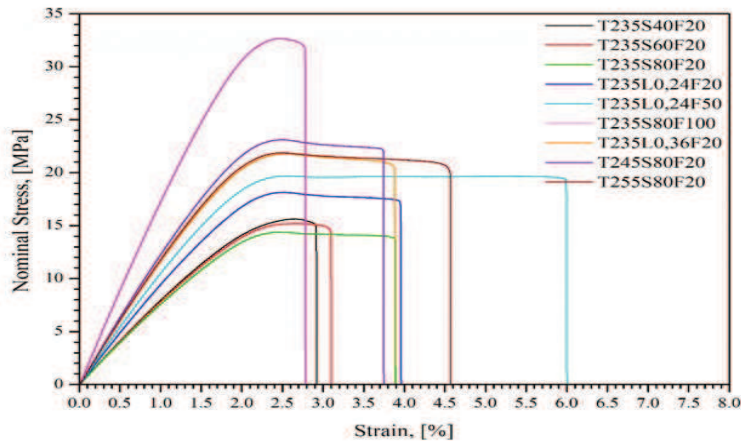
$\text{kJ/m}^2$  değerine ulaşabilmiştir. Bu düşüklük, yapının gevrekleşmesine ve enerjiyi absorbe edememesine neden olmuştur. Eğme testinde başarılı olan T235S80F100 numunesi, darbe dayanımında ise zayıf kalmıştır. Bu sonuç, darbe direncinin yalnızca rijitlik değil, aynı zamanda bağ kalitesine ve iç yapı sürekliliğine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

#### 4.4. Sonuç ve Yorumlar

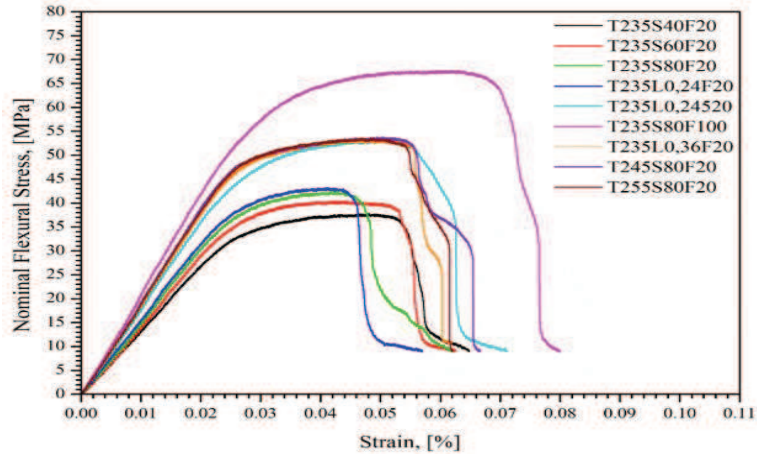
Nominal çekme ve eğme verileri, düşük sıcaklık ve düşük dolulukta üretilen numunelerin mekanik performans açısından zayıf kaldığını göstermektedir. T235L0.24F50 numunesi, özellikle çekme dayanımı bakımından en iyi performansı sergileyerek katman kalınlığının etkisini ortaya koymuştur. T235S80F100 numunesi yüksek modulus değerlerine rağmen, yüksek hız nedeniyle yapısal zayıflık göstermiştir. Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de ilgili grafiklerle belirtilmiştir.

**Tablo 4.1.** Deneysel Nominal Çekme ve Nominal Eğme Özelliklerinin Sonuçları

| Numune İsmi  | Nominal Elastik Modül (MPa) | Nominal Çekme Dayanımı (Mpa) | Kopma Uzamanası (%) | Nominal Bükme Modülü (Mpa) | Nominal Bükme Dayanımı (Mpa) | Gerilme (%)   |
|--------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|---------------|
| T235S40F20   | 834.66±20.69                | 15.70±0.20                   | 3.09±0.27           | 1324.26±31.64              | 37.56±1.25                   | 0.0631±0.0079 |
| T235S60F20   | 820.02±9.27                 | 15.33±0.35                   | 3.50±.65            | 1389.19±23.28              | 39.25±0.64                   | 0.0599±0.0048 |
| T235S80F20   | 786.02±6.59                 | 14.52±0.16                   | 3.71±0.29           | 1461.10±61.26              | 40.78±1.78                   | 0.0591±0.0067 |
| T235L0.24F20 | 973.78±4.10                 | 17.91±0.27                   | 3.83±0.71           | 1572.08±17.82              | 43.54±1.01                   | 0.0586±0.0085 |
| T235L0.24F50 | 1055.64±31.46               | 19.73±0.11                   | 5.53±0.34           | 1740.86±18.10              | 52.79±0.64                   | 0.0671±0.0037 |
| T235S80F100  | 1742.55±32.66               | 32.95±0.82                   | 3.07±0.39           | 1980.96±26.47              | 66.54±1.06                   | 0.0743±0.0038 |
| T235L0.36F20 | 1212.73±52.13               | 22.13±1.21                   | 3.89±0.15           | 1839.37±17.38              | 52.25±0.79                   | 0.0626±0.0066 |
| T245S80F20   | 1263.98±3.26                | 23.09±0.30                   | 3.75±0.08           | 1686.79±5.99               | 53.65±0.46                   | 0.0683±0.0122 |
| T255S80F20   | 1222.04±5.88                | 21.96±0.24                   | 4.45±0.23           | 1805.94±27.74              | 52.23±0.89                   | 0.0646±0.0069 |



**Şekil 4.1.** Nominal Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği

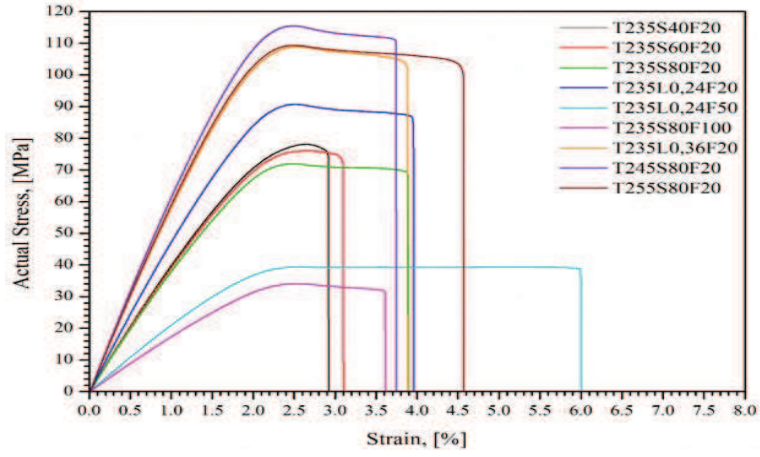


**Şekil 4.2.** Nominal Eğilme Gerilmesi-Şekil Değiştirme Grafiği

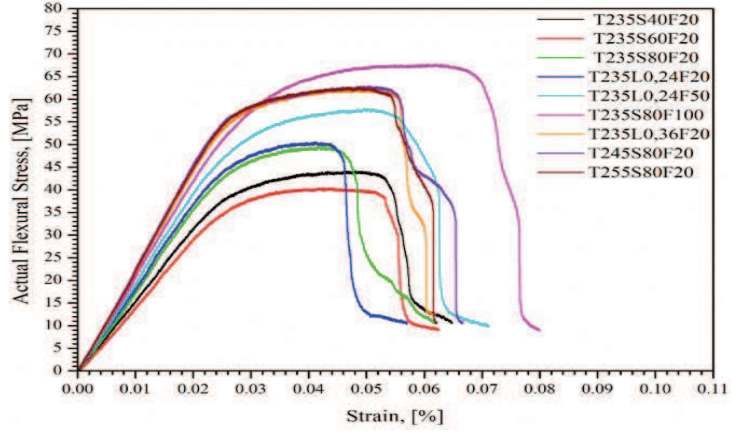
Gerçek değerlere göre T245S80F20 numunesi, hem çekme hem eğme testlerinde en yüksek dayanımı sergileyerek optimum baskı sıcaklığını ve doluluk oranını temsil etmektedir. Actual stress-strain eğrileri, bazı numunelerde erken kopma eğilimiyle yapısal zayıflığı açıkça göstermektedir. T235S80F100 numunesi yüksek doluluğa rağmen düşük mukavemet göstererek, üretim hızının bağ kalitesi üzerindeki olumsuz etkisini kanıtlamıştır. Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de ilgili grafiklerle belirtilmiştir.

**Tablo 4.2.** Deneysel Gerçek Çekme ve Gerçek Eğme Özelliklerinin Sonuçları

| Numune İsmi  | Gerçek Elastik Modül (MPa) | Gerçek Çekme Dayanımı (Mpa) | Kopma Uzaması (%) | Gerçek Bükme Modülü (Mpa) | Gerçek Bükme Dayanımı (Mpa) | Gerilme (%)   |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|
| T235S40F20   | 4170.66±53.34              | 78.77±0.67                  | 3.09±0.27         | 1549.23±37.02             | 44.03±1.53                  | 0.0631±0.0079 |
| T235S60F20   | 4073.48±65.64              | 76.61±1.81                  | 3.50±.65          | 1625.19±27.23             | 40.71±2.60                  | 0.0599±0.0048 |
| T235S80F20   | 3946.35±19.04              | 72.66±0.78                  | 3.71±0.29         | 1709.32±71.67             | 47.94±2.14                  | 0.0591±0.0067 |
| T235L0.24F20 | 4852.90±14.79              | 89.58±1.41                  | 3.83±0.71         | 1839.16±20.85             | 51.07±1.11                  | 0.0586±0.0085 |
| T235L0.24F50 | 2109.96±62.01              | 37.49±1.41                  | 5.53±0.34         | 1891.53±19.66             | 57.48±0.67                  | 0.0671±0.0037 |
| T235S80F100  | 1742.55±32.66              | 32.95±0.82                  | 3.07±0.39         | 1980.85±26.47             | 66.54±1.06                  | 0.0743±0.0038 |
| T235L0.36F20 | 6064.30±255.20             | 110.55±6.01                 | 3.89±0.15         | 2151.86±20.34             | 61.12±0.93                  | 0.0626±0.0066 |
| T245S80F20   | 6322.55±20.64              | 115.55±0.6                  | 3.75±0.08         | 2186.27±7.01              | 62.60±0.92                  | 0.0683±0.0122 |
| T255S80F20   | 6122.87±24.53              | 109.70±1.27                 | 4.45±0.23         | 2112.75±32.46             | 61.24±1.11                  | 0.0646±0.0069 |



Şekil 4.3. Gerçek Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği

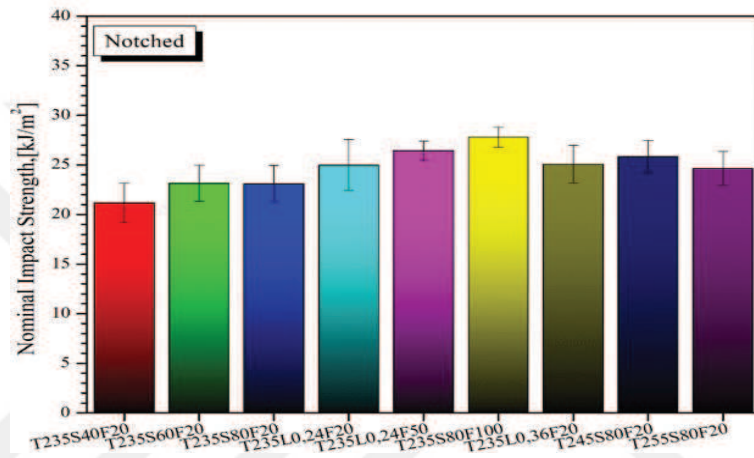
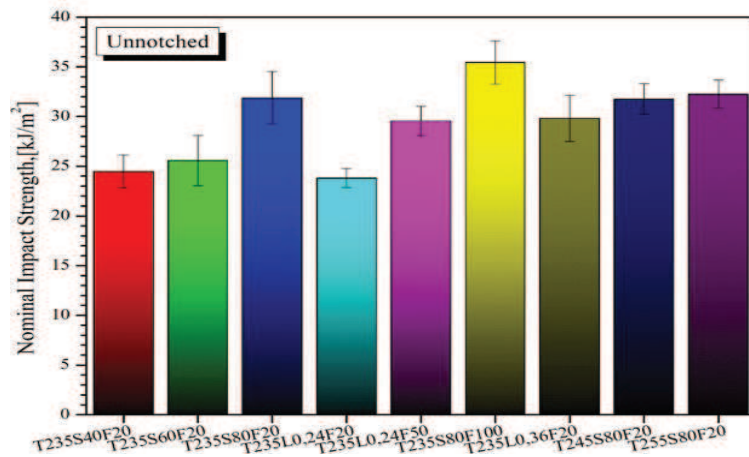


Şekil 4.4. Gerçek Eğilme Gerilmesi-Şekil Değiştirme Grafiği

Nominal darbe testinde çentiksiz sonuçlarda T235S80F100, çentikli sonuçlarda ise T245S80F20 ön plana çıkmaktadır. Düşük sıcaklık ve düşük dolulukta üretilen numuneler (örn. T235S40F20) darbe yükü altında kırılğan davranış sergilemiştir. Çentik varlığı tüm numunelerde darbe dayanımını düşürmüş, iç yapı sürekliliğinin önemini ortaya koymuştur. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da ilgili grafiklerle belirtilmiştir.

**Tablo 4.3.** Deneyisel Nominal Darbe Dayanımı Sonuçları

| Numune İsmi  | Çentiksiz Nominal Darbe Dayanımı (Kj/m <sup>2</sup> ) | Çentikli Nominal Darbe Dayanımı (Kj/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| T235S40F20   | 24.49±1.65                                            | 21.19±1.99                                           |
| T235S60F20   | 25.57±2.53                                            | 23.16±1.82                                           |
| T235S80F20   | 31.88±2.65                                            | 23.11±1.84                                           |
| T235L0.24F20 | 23.81±0.96                                            | 24.98±2.57                                           |
| T235L0.24F50 | 29.55±1.49                                            | 26.43±0.97                                           |
| T235S80F100  | 35.44±2.17                                            | 27.79±1.01                                           |
| T235L0.36F20 | 29.81±2.327                                           | 25.08±1.91                                           |
| T245S80F20   | 31.76±1.54                                            | 25.83±1.63                                           |
| T255S80F20   | 32.25±1.40                                            | 24.66±1.71                                           |

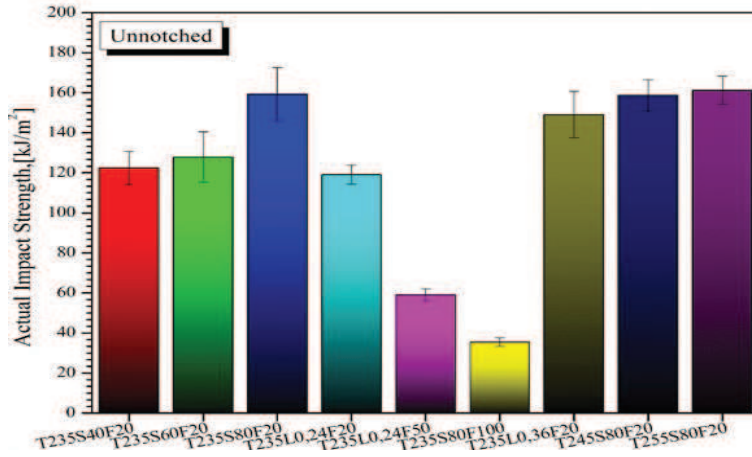
**Şekil 4.5.** Nominal Darbe Dayanımı Grafiği**Şekil 4.6.** Nominal Darbe Dayanımı Grafiği

Gerçek darbe dayanımı sonuçlarında T245S80F20 numunesi açık ara en dayanıklı yapı olarak öne çıkmıştır. Özellikle çentikli testlerde bazı numuneler gevrek kırılma göstermiştir; bu durum iç doluluk ve sıcaklık etkisiyle doğrudan ilişkilidir. Actual sonuçlar, nominale göre daha doğru

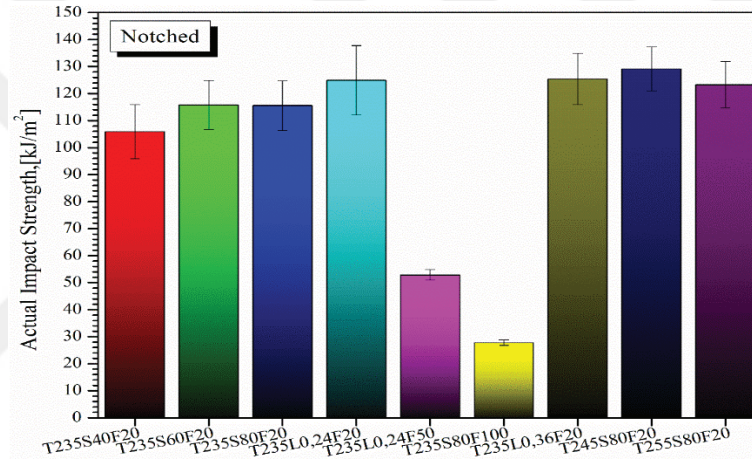
yapısal yoruma imkân tanımış ve baskı parametre optimizasyonunun önemini vurgulamıştır. Yapılan bu deneysel çalışma, FDM teknolojisiyle üretim sırasında kullanılan baskı parametrelerinin, mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Baskı sıcaklığının artırılması, katmanlar arası yapışmayı güçlendirerek çekme, eğme ve darbe dayanımlarını artırmakta; katman kalınlığının artırılması ise yapının rijitliğini desteklemektedir. Ancak yazdırma hızının fazla olması, malzeme kalitesini düşürebilmektedir. Dolayısıyla, mühendislik uygulamalarına yönelik FDM üretimlerinde, hedeflenen performans kriterlerine uygun parametre seçimi yapılması kritik öneme sahiptir. Bu çalışmanın bulguları, ileride yapılacak optimizasyon çalışmalarına altyapı sağlayabilecek niteliktedir. Bu çalışma kapsamında, FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemiyle ABS hammaddesi kullanılarak üretilmiş numunelerin termal davranışları, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiziyle incelenmiştir. DSC analizleri, özellikle polimer malzemelerde amorf fazın karakteristiğini tanımlamak açısından oldukça kritik bir parametre olan cam geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) üzerinden değerlendirilmiştir. Polimerlerin termal karakterizasyonunda T<sub>g</sub> değeri, zincir segmentlerinin serbest hareket etmeye başladığı sıcaklık aralığını ifade eder ve bu değer, malzemenin kullanım sıcaklığı, boyutsal kararlılığı ve mekanik performansının doğrudan bir göstergesidir (Callister & Rethwisch vd., 2018). Analizler sırasında, DSC grafiklerinde mavi eğri ile gösterilen midpoint (geçiş eğrisinin ortası) noktası T<sub>g</sub> referansı olarak alınmış, bu noktadaki sıcaklık değeri üzerinden her bir numunenin termal kararlılığı yorumlanmıştır. Bu yaklaşım, ASTM D3418 standardına uygun olarak yapılmıştır ve sonuçlar, kullanılan üretim parametrelerinin polimer matris üzerindeki etkilerini detaylı şekilde yansıtmaktadır. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de ilgili grafiklerle belirtilmiştir.

**Tablo 4.4.** Deneysel Gerçek Darbe Dayanımı Sonuçları

| Numune İsmi  | Gerçek Darbe Dayanımı (Kj/m <sup>2</sup> ) | Çentikli Gerçek Darbe Dayanımı (Kj/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| T235S40F20   | 122.43±8.23                                | 105.93±9.98                                         |
| T235S60F20   | 127.86±12.64                               | 115.78±9.09                                         |
| T235S80F20   | 159.38±13.26                               | 115.55±9.18                                         |
| T235L0.24F20 | 119.06±4.78                                | 124.92±12.83                                        |
| T235L0.24F50 | 59.10±2.98                                 | 52.88±1.93                                          |
| T235S80F100  | 35.44±2.17                                 | 27.79±1.01                                          |
| T235L0.36F20 | 149.07±11.63                               | 125.39±9.52                                         |
| T245S80F20   | 158.81±7.69                                | 129.25±8.13                                         |
| T255S80F20   | 122.43±8.23                                | 123.28±8.56                                         |



Şekil 4.7. Gerçek Darbe Dayanımı Grafiği



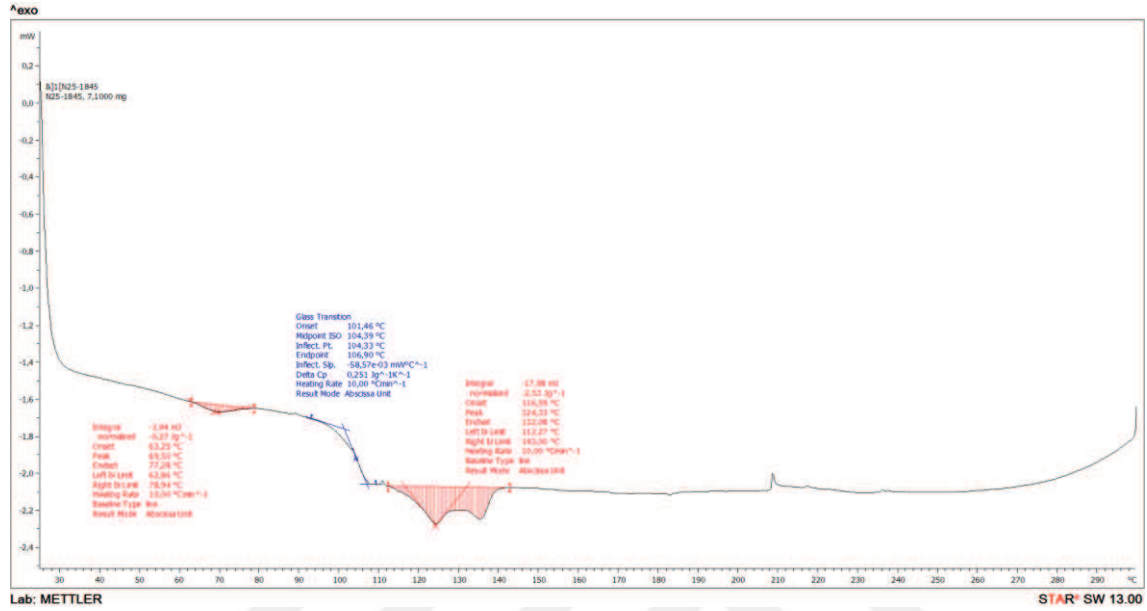
Şekil 4.8. Gerçek Darbe Dayanımı Grafiği

#### 4.5. Termal Analiz Bulgularının Tartışılması

##### 4.5.1. DSC Sonuçlarının Proses Parametreleriyle İlişkisi

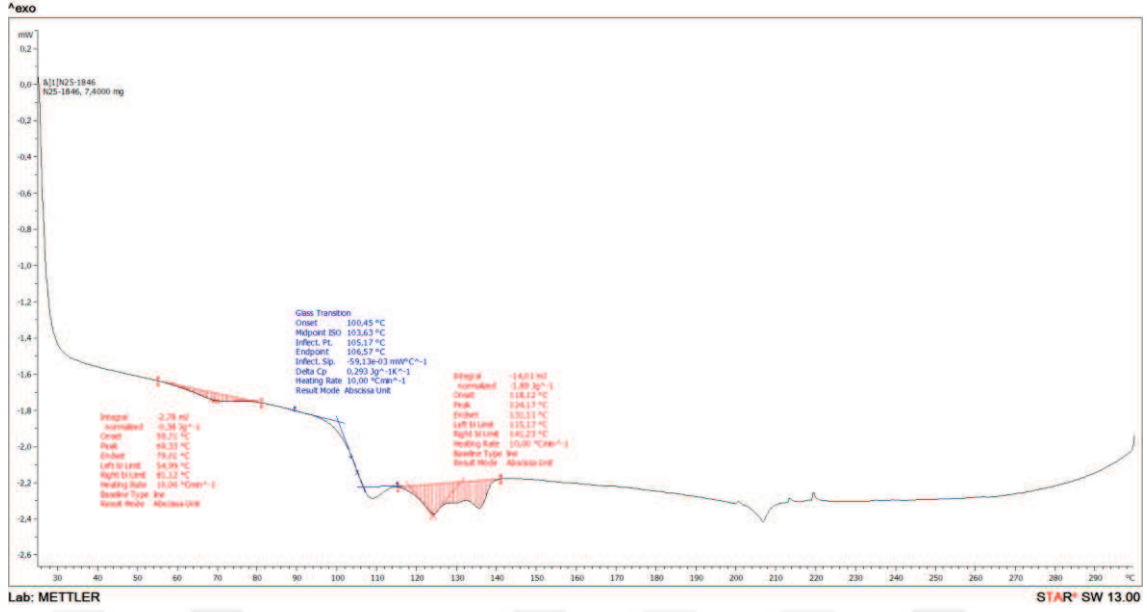
T235S40F20 kodlu numuneye ait DSC grafiği Şekil 3.19’da verilmiştir. T235S40F20 kodlu numune için tespit edilen 105°C’lik camısı geçiş sıcaklığı, ABS için literatürde sıklıkla bildirilen 104–106°C aralığı ile yüksek düzeyde örtüşmektedir (Kuo vd., 2020). Bu durum, üretim sırasında uygulanan baskı parametrelerinin (özellikle ekstrüder sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızı gibi) polimer zincir yapısına zarar vermediğini ve zincir segmentlerinin düzenini bozacak herhangi bir termal degradasyonun meydana gelmediğini göstermektedir. Tg değerinin bu seviyede olması, polimerin servis koşullarında rijitliğini koruyacağını ve özellikle yüksek

sıcaklık altında şekil bozulmasına karşı direnç göstereceğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu yapı, parçanın boyutsal doğruluk açısından da stabil bir yapı sergileyeceği anlamına gelmektedir (Wang vd., 2019). Şekil 4.9.'da ilgili grafikte belirtilmiştir.



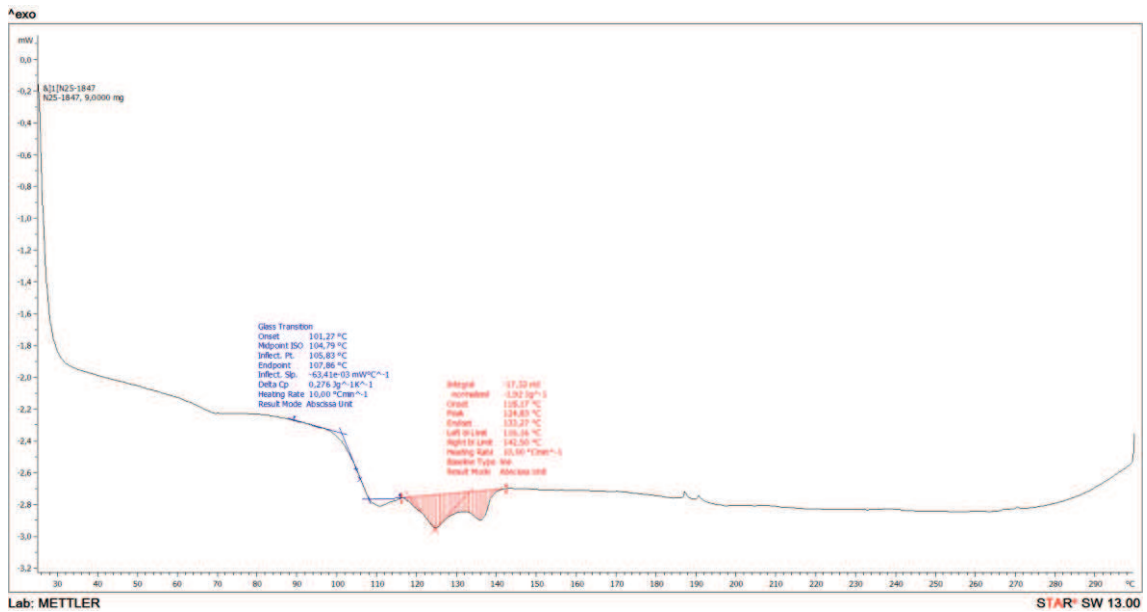
Şekil 4.9. T235S40F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği

T235S60F20 numunesi için elde edilen Tg değeri, T235S40F20 numunesi ile yüksek korelasyon göstermekte ve üretim parametrelerinin tutarlılığına işaret etmektedir. Bu düzeyde bir Tg, ABS'nin amorf yapısının bozulmadığını ve baskı sürecinin kontrollü bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Tg'nin bu aralıkta kalması, malzemenin hem darbe direnci hem de şekil kararlılığı açısından üstün performans sunmaya devam edeceğini ifade etmektedir (Turng vd., 2017). Üstelik bu değer, literatürde referans gösterilen Tg aralığına yakın olması, kullanılan filamentin saflığını ve katkı malzemesi içermeyen yapısını da dolaylı olarak desteklemektedir. T235S80F20 numunesinde belirlenen yaklaşık 101°C'lik Tg değeri, literatürün önerdiği aralığın alt limitine yaklaşmakta olup, termal kararlılıkta hafif bir düşüşe işaret etmektedir. Bu durum, polimer segmentleri arasındaki bağlanma yoğunluğunun azaldığını, yani segmental hareketliliğin artmış olabileceğini düşündürmektedir. Bu artış genellikle, düşük baskı sıcaklığı, hızlı soğuma süreleri ya da doluluk oranının düşük tutulması gibi parametre değişikliklerinden kaynaklanabilmektedir (Sood vd., 2012). Tg'deki bu hafif düşüş, uygulama ortamlarında malzemenin daha düşük sıcaklıklarda yumuşamaya başlayabileceğini ve boyutsal deformasyon riskinin artabileceğini göstermektedir. Şekil 4.10.'da ilgili grafikte belirtilmiştir.



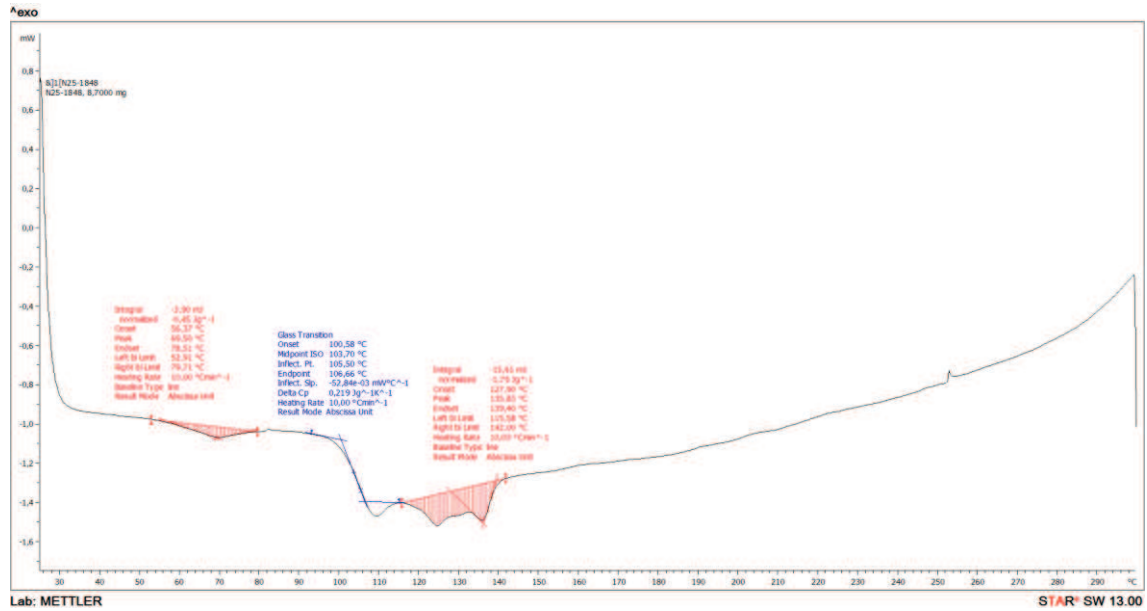
Şekil 4.10. T235S60F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği

T235S80F20 numenisinde ölçülen Tg değeri, yaklaşık 99°C olarak belirlenmiş ve bu değer, çalışmadaki en düşük cam geçiş sıcaklığı olarak dikkat çekmiştir. Bu sonuç, üretim sırasında uygulanan parametrelerin, özellikle düşük ekstrüder sıcaklığı veya yetersiz soğutma kontrolü gibi nedenlerle polimer zincirlerinin kristallenmesini veya sıkı segmental paketlenmesini engellemiş olabileceğini düşündürmektedir (Ziemian vd., 2015). Tg'nin bu kadar düşük seviyeye inmesi, malzemenin mekanik dayanım açısından zayıflamış olabileceğini, ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarında fonksiyonel başarısızlık riski taşıdığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.11.'de ilgili grafikte belirtilmiştir.



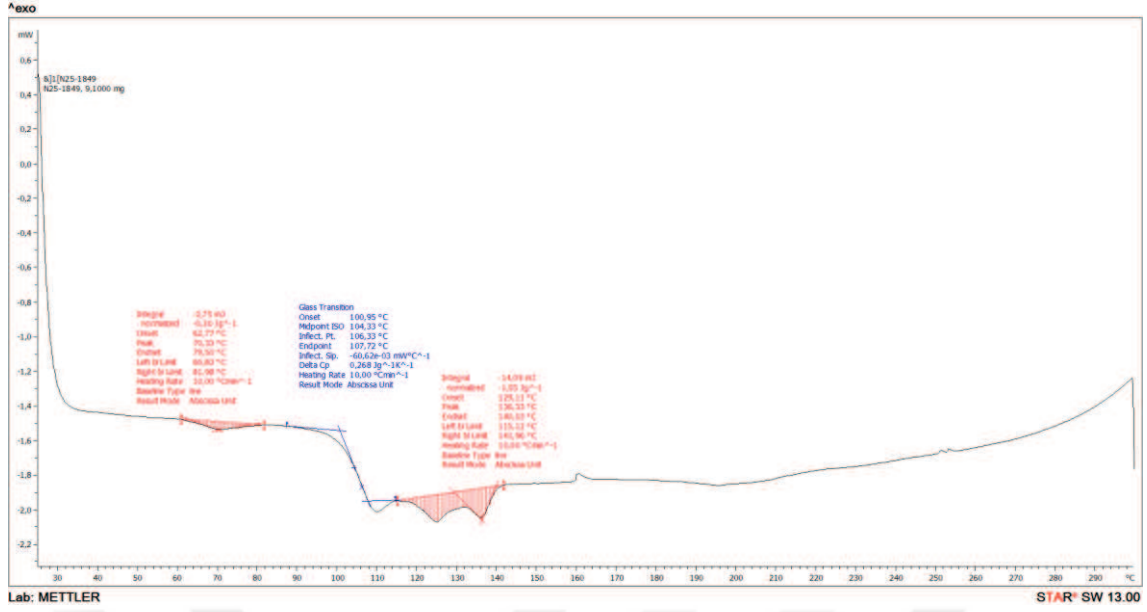
Şekil 4.11. T235S80F20 Kodlu Numuneye Ait DSC Grafiği

T235L0.36F20 numunesinde ölçülen Tg değeri, yaklaşık 99°C olarak belirlenmiş ve bu değer, çalışmadaki en düşük cam geçiş sıcaklığı olarak dikkat çekmiştir. Bu sonuç, üretim sırasında uygulanan parametrelerin, özellikle düşük ekstrüder sıcaklığı veya yetersiz soğutma kontrolü gibi nedenlerle polimer zincirlerinin kristallenmesini veya sıkı segmental paketlenmesini engellemiş olabileceğini düşündürmektedir (Ziemian vd., 2015). Tg'nin bu kadar düşük seviyeye inmesi, malzemenin mekanik dayanım açısından zayıflamış olabileceğini, ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarında fonksiyonel başarısızlık riski taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu numune, özellikle boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalar için riskli kabul edilmelidir. Şekil 4.12.'de ilgili grafikte belirtilmiştir.



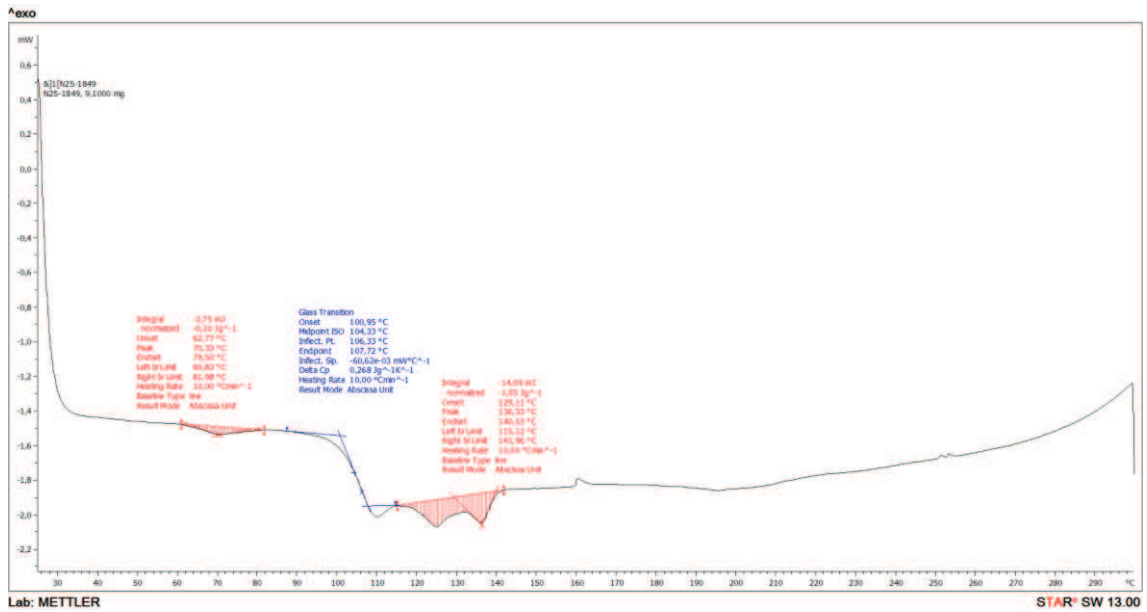
Şekil 4.12. T235L0.36F20 Kodlu numuneye Ait DSC Grafiği

T245S80F20 numunesinde ölçülen yaklaşık 106°C'lik cam geçiş sıcaklığı, çalışmadaki en yüksek değer olarak kaydedilmiştir. Bu yüksek Tg değeri, üretim sırasında uygulanan parametrelerin (örneğin daha yüksek ekstrüder sıcaklığı ve ideal doluluk oranı) polimer zincirleri arasındaki fiziksel bağlanmayı artırdığını ve malzemenin daha sıkı bir amorf yapı geliştirdiğini göstermektedir. Bu tür bir yapı, polimerin hem termal hem de mekanik olarak rijitliğini artırmakta, dolayısıyla hem yük altında deformasyonlara karşı direnç göstermekte hem de yüksek servis sıcaklıklarında performans kaybı yaşamamaktadır (Ngo vd., 2018). Bu numune, özellikle mekanik mukavemet gerektiren endüstriyel uygulamalar açısından oldukça elverişli görünmektedir. Şekil 4.13.'de ilgili grafikte belirtilmiştir.



Şekil 4.13. T245S80F20 Kodlu Numune Ait DSC Grafiği

T255S80F20 numunesinde T<sub>g</sub> değeri, 102°C olarak tespit edilmiş ve bu değer, ortalama bir termal kararlılık göstergesi olarak yorumlanmıştır. Ne çok yüksek ne de çok düşük T<sub>g</sub> sergileyen bu yapı, üretim sürecinin dengeli gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durumda kullanılan parametrelerin zincir segmentlerinin düzenini koruyacak ölçüde uygulanmış olduğu anlaşılmaktadır. Böyle bir yapı, orta düzeyde termal dayanım, kabul edilebilir mekanik rijitlik ve genel performans beklentisi sunmaktadır (Bikas vd., 2016). Şekil 4.14’de ilgili grafikte belirtilmiştir.



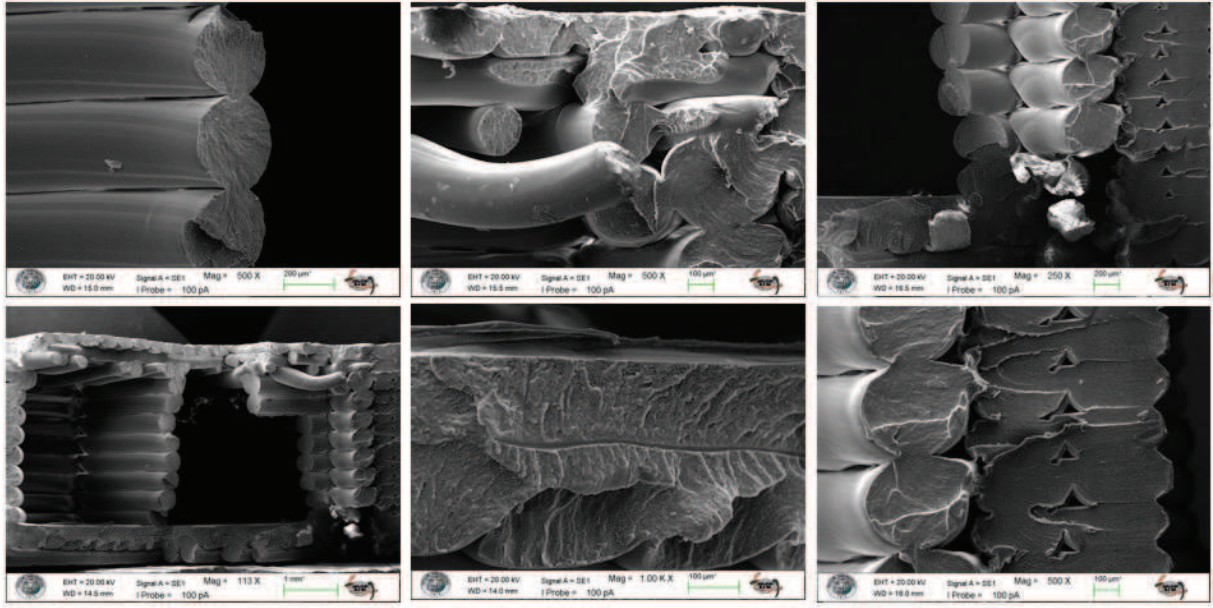
Şekil 4.14. T255S80F20 Kodlu Numune Ait DSC Grafiği

#### 4.5.2. Genel Bilimsel Değerlendirme

Toplamda değerlendirildiğinde, DSC analizleriyle elde edilen Tg değerleri, FDM yöntemiyle ABS malzemesi kullanılarak üretilen numunelerde baskı parametrelerinin doğrudan termal yapı üzerinde etkili olduğunu açık bir şekilde ortaya koymuştur. Tg'nin 99–106°C aralığında değişiklik göstermesi, üretim parametrelerinin amorf fazın zincir segmentleri arasındaki etkileşimleri nasıl değiştirdiğini net biçimde göstermektedir. Yüksek Tg (105–106°C) gösteren numunelerde termal stabilitenin korunduğu, baskı parametrelerinin optimum düzeyde belirlendiği ve dolayısıyla malzemenin daha yüksek servis sıcaklıklarında bile yapısal olarak kararlılığını koruyabileceği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, Tg değeri 101°C'nin altına düşen numunelerde segmental mobilite artışı gözlemlenmiş, bu da polimerin mekanik ve termal performansında olası bir zayıflamayı beraberinde getirmiştir. Bu bulgular, yalnızca DSC'nin değil, aynı zamanda FDM sürecinde termal analiz temelli üretim optimizasyonunun ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır. Cam geçiş sıcaklığı, baskı parametrelerinin nihai ürün üzerindeki etkisini ölçmek adına kritik bir indikatör olarak kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda, Tg ile mekanik dayanım, yüzey pürüzlülüğü ve yapısal bütünlük arasındaki çok değişkenli ilişkilerin nicel olarak modellenmesi, FDM süreçlerinin dijital ikizlerine giden yolda önemli bir adım olacaktır.

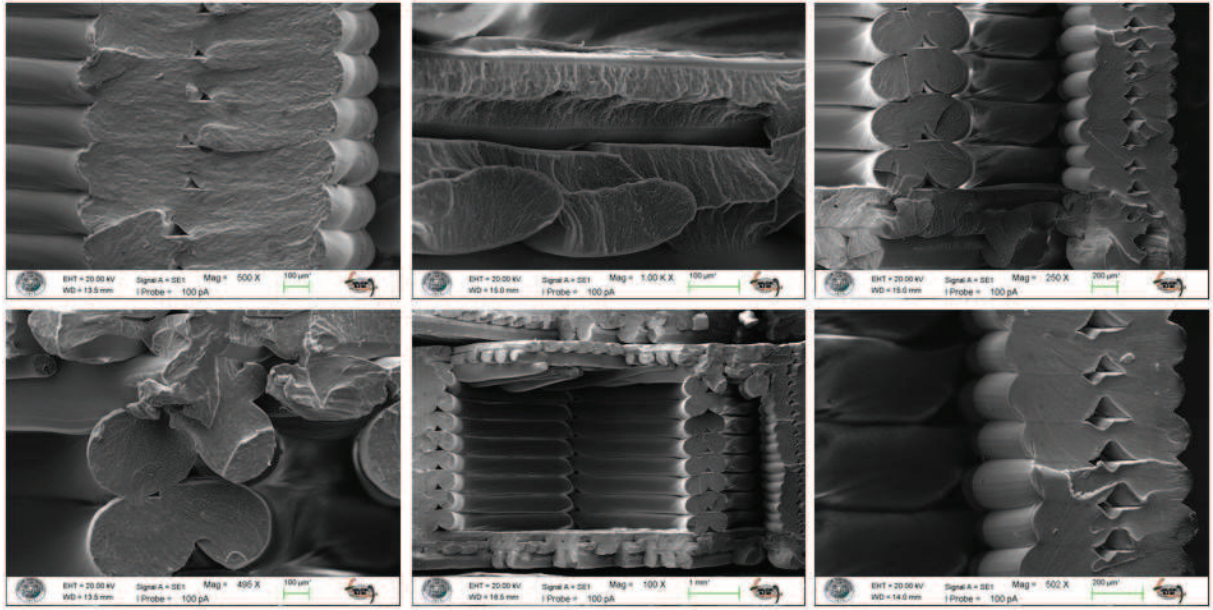
#### 4.6. Mikroyapı ve Morfolojik Analizlerin İncelenmesi

Bu parametrelerle üretilen T235S40F20 numunesinin SEM görüntüsünde, düşük baskı hızının etkisiyle filamentlerin tabakalar arasında düzgün yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu düzgün yerleşim, katmanlar arası iyi bir bağlanma sağlayarak porozitenin minimum düzeyde kalmasına katkıda bulunmuştur. Filament hatları net ve düzenli olup, yazdırma sürecinin kararlı şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Hücresel boşluklar homojen ve kompakt dağılmış, bu da yapıya hafiflik kazandırırken yeterli mekanik dayanımı korumuştur. Elde edilen yapı, yüzey kalitesi ve bütünlük açısından başarılı bir performans sergilemektedir. Şekil 4.15.'te ilgili görsel belirtilmiştir.



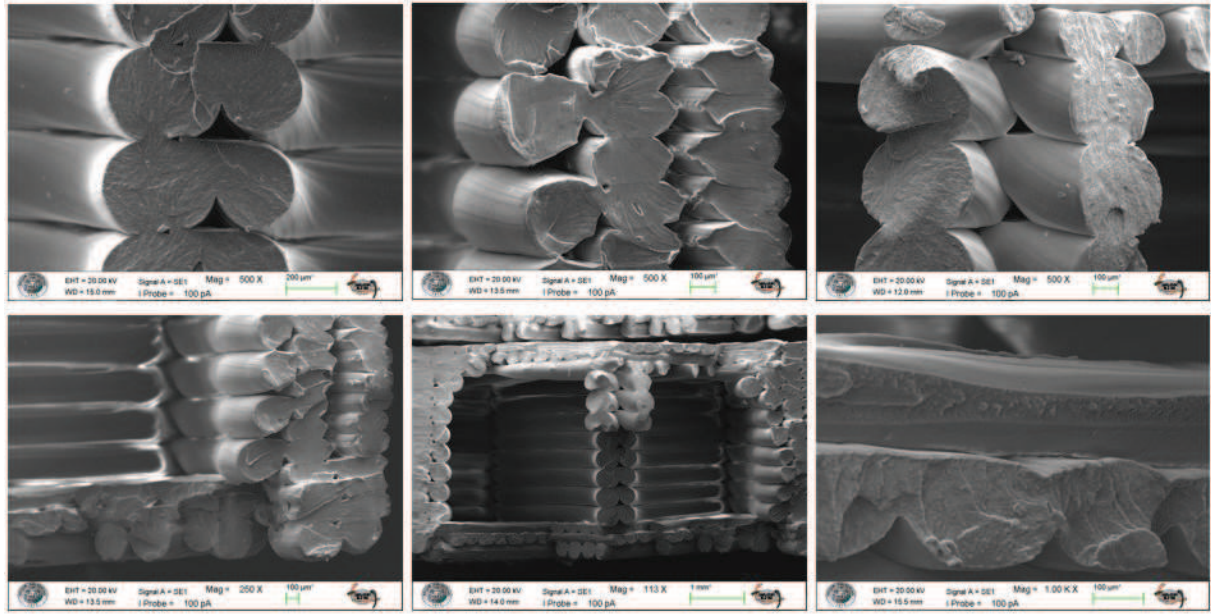
Şekil 4.15. T235S40F20 SEM Görüntüsü

T235S60F20 numunesi için baskı parametreleri arasında yalnızca baskı hızı artırılmış ve bu işlem 60 mm/s hızla gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, filamentler arasında hafif kopuklukların meydana geldiği ve tabaka kenarlarında belirgin yığılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, artan hız nedeniyle yeterli soğuma süresi sağlanamadığından, filament liflerinin düzensiz bir şekilde yerleşmiş olabileceği değerlendirilmektedir. Şekil 4.16.’da ilgili görsel belirtilmiştir.



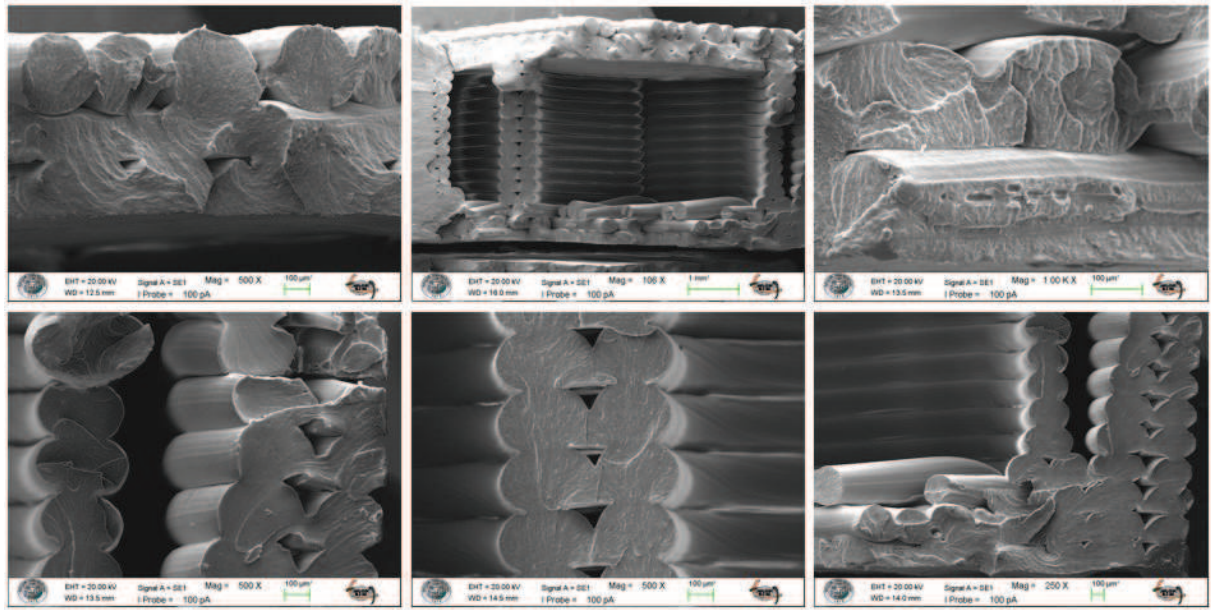
**Şekil 4.16.** T235S60F20 SEM Görüntüsü

T235S80F20 numunesi için parametreler arasında yalnızca baskı hızı artırılarak 80 mm/s olarak uygulanmış ve bu grup en hızlı baskı parametresine sahip olmuştur. SEM görüntüleri incelendiğinde, filamentlerin düzensiz bir şekilde yerleştiği ve katmanlar arasında belirgin boşlukların olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapı, katman geçişlerinde füzyon eksikliğine işaret etmekte olup, delaminasyon başlangıçlarının meydana geldiğini göstermektedir. Ayrıca, yüksek hızın neden olduğu yetersiz termal bağlanma sonucu mikroskobik düzeyde çatlak çekirdeklerinin oluşabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.17.'de ilgili görsel belirtilmiştir.



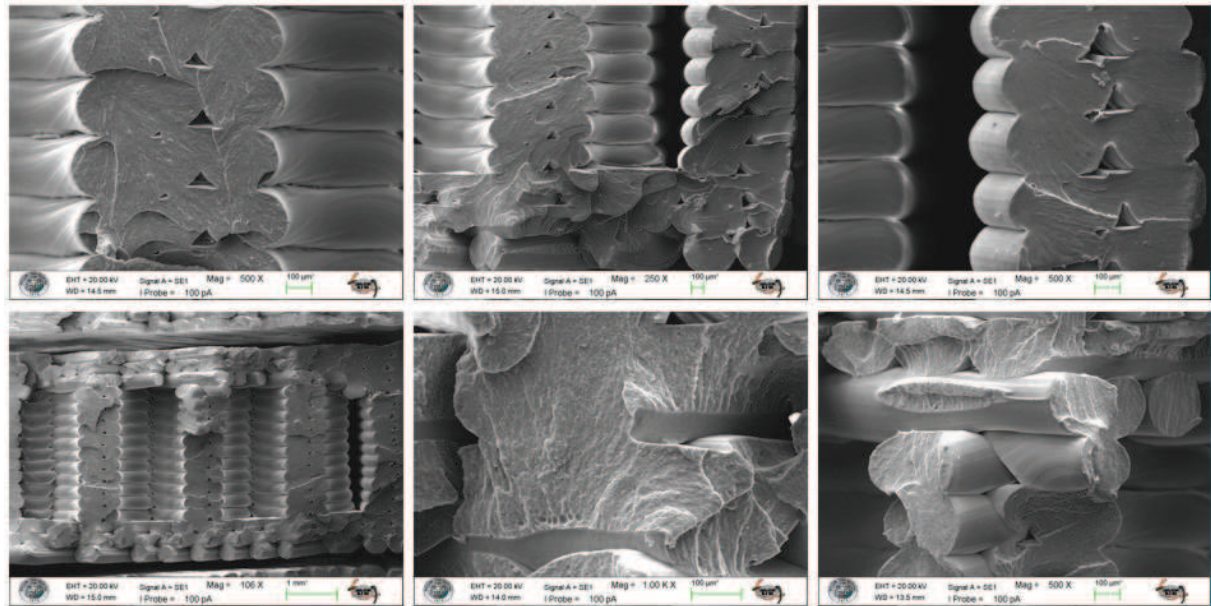
**Şekil 4.17.** T235S80F20 SEM Görüntüsü

T235L0.24F20 numunesinde yalnızca katman kalınlığı artırılarak 0.24 mm olarak uygulanmıştır. SEM görüntülerinde, katman geçişlerinin daha kalın olduğu ve yüzeyde “stair-step” (basamaklanma) izlerinin belirgin şekilde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, filament lifleri arasında sıkışmanın azaldığı ve bu nedenle birleşme alanlarının daha dar kaldığı değerlendirilmiştir. Bu durum, katmanlar arası bağlanmanın önceki ince katmanlı örneklerle kıyasla daha zayıf olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.18.’de ilgili görsel belirtilmiştir.



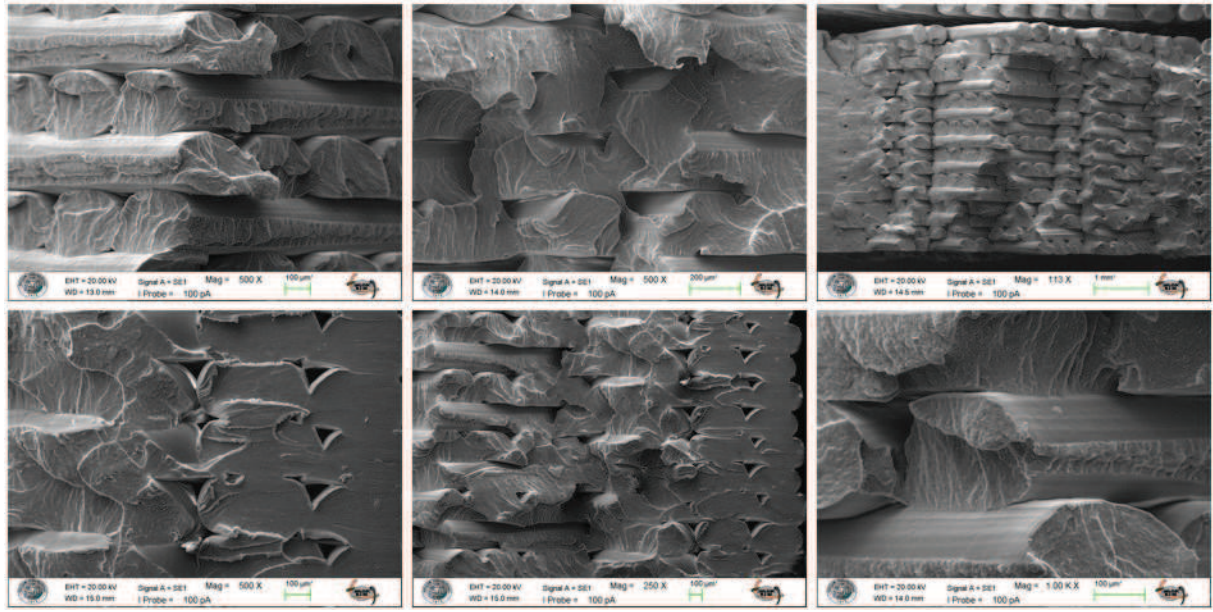
Şekil 4.18. T235L0.24F20 SEM Görüntüsü

T235L0.24F50 numunesinde katman kalınlığı sabit tutulmuş, doluluk oranı ise %50'ye çıkarılmıştır. SEM görüntülerinde iç yapının daha yoğun olduğu ve filament lifleri arasında boşlukların azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak katman kalınlığının yüksek olması nedeniyle, yüzeydeki düzensizliklerin devam ettiği ve bu durumun yüzey morfolojisini olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır. Şekil 4.19.'da ilgili görsel belirtilmiştir.



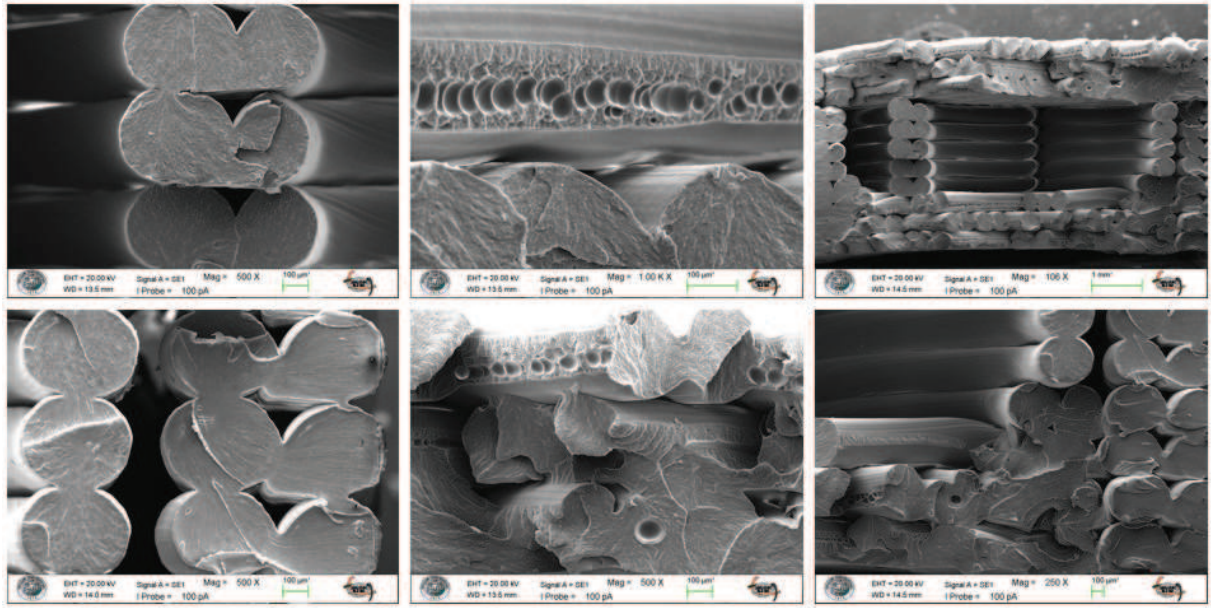
Şekil 4.19. T235L0.24F50 SEM Görüntüsü

T235S80F100 numunesinde doluluk oranı %100 olarak ayarlanmış ve en kompakt yapı elde edilmiştir. SEM görüntülerinde filament hatları arasında tamamen sıkı bir bağlanma olduğu ve yapının homojen bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Katmanlar düzgün bir şekilde yerleşmiş olup, yüksek düzeyde kaynaşma kalitesi sağlanmıştır. Poroziteye rastlanmamış, mikro yapıda filament hatlarının sınırları belirginliğini kaybederek silikleşmiştir. Bu durum, malzeme bütünlüğünün oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Şekil 4.20.'de ilgili görsel belirtilmiştir.



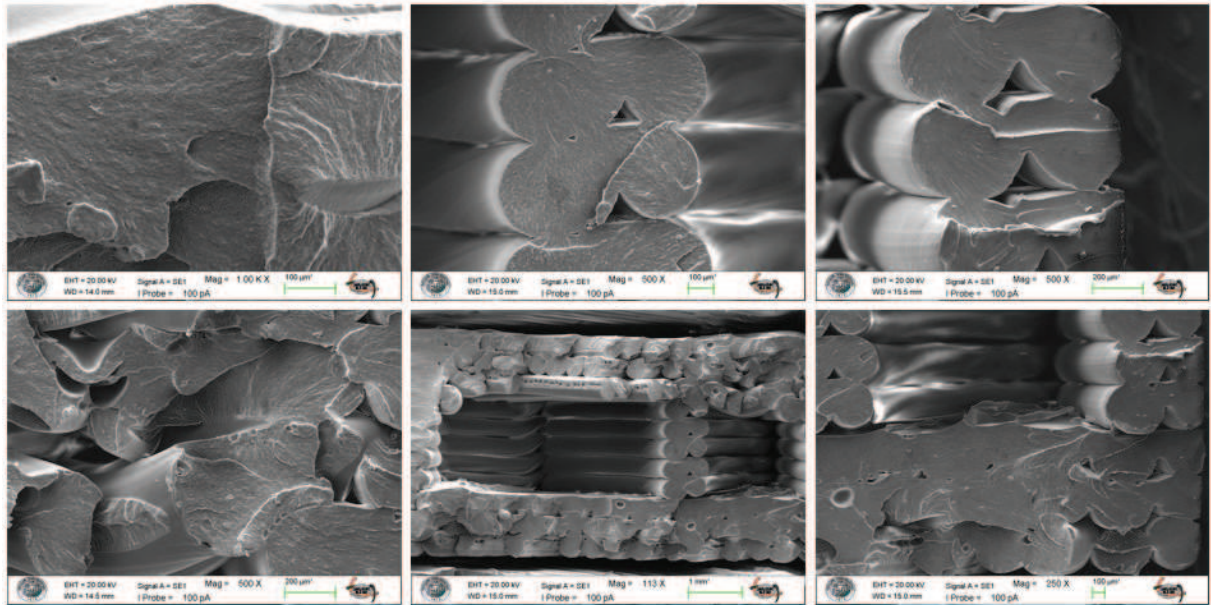
**Şekil 4.20.** T235S80F100 SEM Görüntüsü

T235L0.36F20 numunesinde katman kalınlığı 0.36 mm'ye çıkarılmış ve doluluk oranı düşük tutulmuştur. SEM görüntülerinde yüzeyde belirgin dalga oluşumları ve yetersiz malzeme akışına bağlı izler gözlemlenmiştir. Katman geçişleri yer yer belirsizleşse de, düşük doluluk nedeniyle iç yapının gevşek kaldığı ve yeterli kompaktlığın sağlanamadığı değerlendirilmiştir. Şekil 4.21.'de ilgili görsel belirtilmiştir.



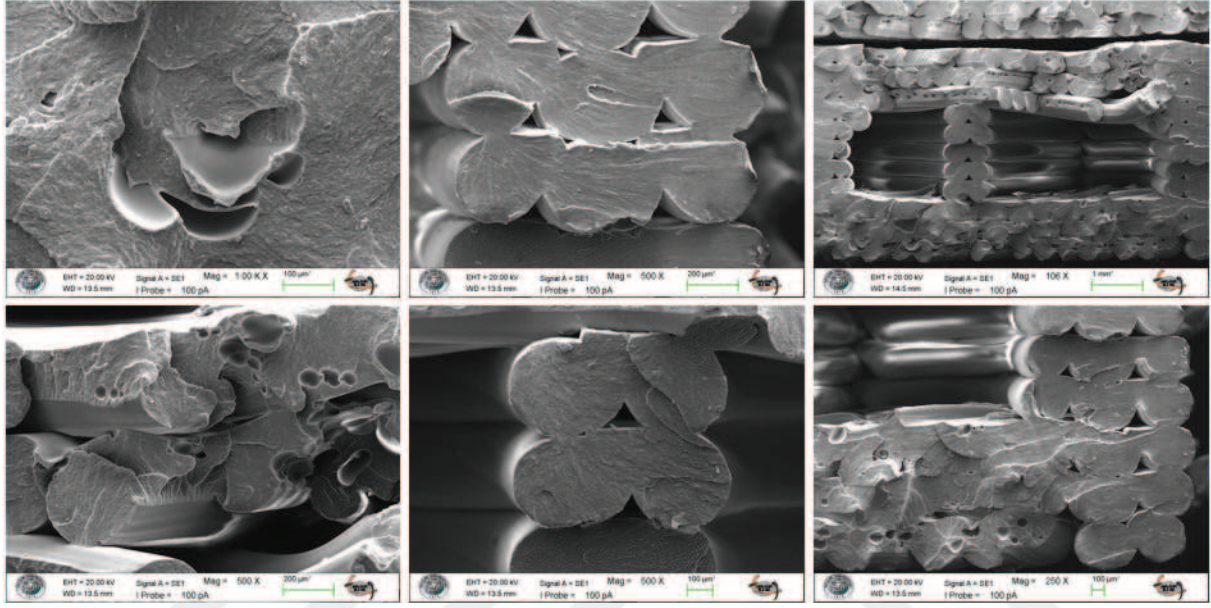
Şekil 4.21. T235L0.36F20 SEM Görüntüsü

T245S80F20 numunesinde ekstrüder sıcaklığı 245°C olarak artırılmıştır. Artan sıcaklık sayesinde filament lifleri arasındaki kaynaşmanın arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzsüzlüğünde belirgin bir iyileşme görülmüş ve filament sınırları daha akışkan bir görünüm kazanmıştır. Şekil 4.22.'de ilgili görsel belirtilmiştir.



Şekil 4.22. T245S80F20 SEM Görüntüsü

T255S80F20 numunesinde ekstrüder sıcaklığı en yüksek değer olan 255°C olarak ayarlanmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisiyle filamentler arasındaki sınırlar neredeyse kaybolmuş ve yapı daha homojen görünmüştür. Ancak aşırı sıcaklık nedeniyle SEM görüntülerinde kabarcıklaşma ve yumuşama izleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu durumun malzeme bozunmasının başlangıcına işaret edebileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.23.'de ilgili görsel belirtilmiştir.



Şekil 4.23. T255S80F20 SEM Görüntüsü

#### 4.6.1. Baskı Hızının Etkisi

Parametre aralığı 40 mm/s ile 80 mm/s arasında değişmiştir (T235S40F20'den T235S80F20'ye kadar). 40 mm/s hızda üretilen örneğin SEM görüntüsünde katman geçişlerinin oldukça homojen olduğu ve filament hatları arasında boşlukların gözlenmediği belirlenmiştir. Düşük baskı hızı sayesinde termoplastik malzemenin düzgün akışı sağlanmış, tabakalar arası difüzyon maksimize edilerek yoğun bir yapışma oluşmuştur. Buna karşılık, 80 mm/s hızla üretilen numunede yüzeyde dalgalı yapılar, mikro çatlaklar ve düzensiz filament hatları görülmüştür. Bu durum, malzemenin yeterince ısınmadan ve katmanlar tam kaynaşmadan bir sonraki katmana geçilmesinden kaynaklanmaktadır. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, yüksek baskı hızlarında çekme ve eğme testlerinde ani kopmalar ve düşük deformasyon davranışlarının ortaya çıkması muhtemeldir.

#### 4.6.2. Doluluk Oranının Etkisi

Parametre aralığı %20 ile %100 doluluk arasında değişmektedir (T235L0.24F20'den T235S80F100'e kadar). %20 dolulukla üretilen numunenin SEM görüntüsünde iç yapıda daha fazla gözeneklilik olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapı, darbe testinde enerji absorpsiyonunun zayıf olmasına yol açabilir. Malzeme çekirdeğinde bulunan boşluklar SEM'de koyu alanlar şeklinde görünmektedir. Buna karşılık, %100 dolulukta filament hatları arasında neredeyse boşluk bulunmamaktadır ve yoğun yapışma ile düzgün bir iç yapı elde edilmiştir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, %100 doluluk darbe ve çekme testlerinde deformasyon öncesi çatlak oluşumunu geciktirerek toplam dayanımı artırmaktadır. Ayrıca, üretim süreleri doluluk oranıyla orantılı olarak artmakta; örneğin %100 doluluklu numunenin üretim süresi 70 dakika olarak kaydedilmiştir.

#### 4.6.3. Katman Kalınlığının Etkisi

Parametre aralığı 0.18 mm ile 0.36 mm katman kalınlığı arasında değişmektedir. 0.18 mm katman kalınlığına sahip numunenin SEM görüntüsünde yüksek çözünürlükle düzgün ve neredeyse pürüzsüz tabaka geçişleri gözlemlenmiş, filament çizgileri arasındaki boşluk minimum seviyede olmuştur. Buna karşılık, 0.36 mm kalınlığındaki numune, SEM'de daha belirgin yüzey dalgaları ve interkatman boşlukları ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, yüzeyde "stair-stepping" (basamaklanma) etkisi de görülmüştür. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, kalın katmanların yüzey pürüzlülüğünü artırarak çatlak oluşum riskini yükselttiği ve bunun eğme testinde düşük eğilme modülüne yol açabileceği belirtilmiştir. Bu numune hızlı üretimle 28 dakika sürede tamamlanmış olup, kısa sürede üretilmesine rağmen mukavemet açısından dezavantaj taşımaktadır.

#### 4.6.4. Ekstrüder Sıcaklığının Etkisi

Parametre aralığı 235°C ile 255°C ekstrüder sıcaklığı arasında değişmektedir. 235°C'de üretilen numunenin SEM görüntüsünde katmanlar arasındaki birleşim bölgelerinde mikroskobik aralıklar görülmüş ve düşük sıcaklığın filamentin yarı erimiş halde kalmasına neden olarak bağ yapısını zayıflattığı belirlenmiştir. 255 °C'de üretilen numunede filament akışı daha homojen olup, yüzeyde füzyon izleri belirgin değildir; ancak yüksek sıcaklığa bağlı mikro-çöküntü ve termal bozulmalar gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, Fused Deposition Modeling (FDM) yöntemiyle üretilen ABS numunelerin mekanik, termal ve mikroyapısal özelliklerinin üretim parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği sistematik bir yaklaşımla araştırılmıştır. Numuneler Siemens NX yazılımı ile tasarlanmış ve FlashForge Creator Pro cihazında, FlashPrint 5 dilimleme yazılımı kullanılarak basılmıştır. Üretim aşamasında baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı olmak üzere dört temel parametre değiştirilmiştir; ardından ASTM standartlarına uygun şekilde çekme, eğme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile numunelerin termal geçiş özellikleri ve mikroyapısal detayları değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, üretim parametrelerinin özellikle baskı sıcaklığı ve tabla sıcaklığı değişimlerinin, hem mekanik performans hem de mikroyapısal bütünlük üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. En yüksek çekme ve eğilme dayanımları, 220–230 °C aralığında belirlenen baskı sıcaklıklarında ve 100–120 °C aralığındaki tabla sıcaklıklarında elde edilmiştir. Bu sıcaklık koşullarında, polimer zincirlerinin mobilizasyonu artmış, katmanlar arası difüzyon iyileşmiş ve bu durum parçaların mekanik dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Özellikle katmanlar arası yapışmanın güçlenmesi, kırılma esnasında çatlak ilerlemesinin zorlaşmasına neden olmuş, bu da daha yüksek mukavemet değerleri ile sonuçlanmıştır. Darbe testlerinde ise daha düşük katman kalınlığına ve orta seviyede baskı hızına sahip numunelerin sünek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, darbe enerjisinin daha homojen bir şekilde absorbe edilmesine olanak sağlamış ve böylece darbe dayanımı artırılmıştır. DSC analizlerinden elde edilen termal geçiş sıcaklıkları incelendiğinde, cam geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) yüksek baskı ve tabla sıcaklıklarında arttığı, buna karşılık soğuk kristalleşme sıcaklığının ( $T_{cc}$ ) düştüğü ve bu değişimlerin daha düzenli bir kristallenmeye işaret ettiği tespit edilmiştir. Ergime sıcaklığı ( $T_m$ ) ise parametrelere daha az duyarlılık göstermiştir. SEM analizleri, yüksek sıcaklıkta üretilen numunelerde daha homojen yapılar, iyi katman kaynaşması ve düşük boşluk oranı göstererek bulguları doğrulamıştır. Düşük sıcaklıklarda ise katman ayrışması, porozite ve yapısal düzensizlikler daha belirgin hale gelmiştir. Bu da, FDM’de kullanılan parametrelerin yalnızca yüzey değil, aynı zamanda iç yapı, kristallenme ve kırılma davranışları üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ışığında, ilerleyen araştırmalarda FDM teknolojisinin daha derinlemesine anlaşılması ve endüstriyel ölçekte daha kararlı sonuçlar elde edilmesi amacıyla bazı geliştirme alanları önerilmektedir. Öncelikle, yalnızca ABS malzemesi ile sınırlı kalmaksızın, PLA, PETG, PA6 gibi farklı termoplastik polimerlerin de benzer şekilde çok boyutlu analizlere tabi tutulması, malzeme-parametre ilişkisini daha kapsamlı şekilde ortaya koyacaktır. Her polimerin kendine özgü termal ve yapısal özelliklere sahip olduğu düşünüldüğünde, bu tür karşılaştırmalı çalışmalar, hem akademik bilgi birikimini artıracak hem de malzeme seçimi süreçlerini daha bilimsel temellere oturtacaktır. Buna ek olarak, DSC ve SEM gibi karakterizasyon yöntemlerinin yanı sıra Termo Gravimetrik Analiz (TGA), X-Işını Difraksiyonu (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) gibi ileri düzey tekniklerin entegre edilmesiyle, polimerlerin termal kararlılığı, kristal yapısı ve kimyasal bağ özellikleri daha ayrıntılı şekilde değerlendirilebilir. Bu sayede üretim koşullarının yalnızca makroskobik değil, moleküler düzeyde de nasıl etki ettiği daha net anlaşılabilir. Ayrıca, çalışmada kullanılan örnekler temel olarak geometrik olarak sade parçalardan oluşmaktadır. Gelecek araştırmalarda, daha karmaşık ve işlevsel geometriye sahip modellerin analiz edilmesi, FDM sürecinde geometrik kompleksitenin mekanik ve termal performansa etkisini ortaya koyacaktır. Üretim yönelimi (build orientation), destek yapılarının etkisi ve çok eksenli yükleme durumlarının incelendiği kapsamlı mekanik testler de bu alanda yeni açılımlar sağlayabilir. Son olarak, günümüzde hızla gelişmekte olan yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı algoritmaların, FDM parametre optimizasyonunda kullanılabilirliği değerlendirilmelidir. Bu tür algoritmalar sayesinde üretim parametreleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkiler daha hızlı ve doğru biçimde modellenebilir, böylece hem zamandan tasarruf sağlanabilir hem de üretim hatalarının minimize edilmesi mümkün olabilir. Bu bağlamda, yapılan bu tez çalışmasının, FDM ile katmanlı üretim teknolojisinin daha kontrollü, optimize ve yüksek performanslı üretim süreçlerine ulaşmasına katkı sağlaması hedeflenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda, malzeme bilimi, üretim teknolojileri ve karakterizasyon disiplinlerinin kesişiminde yer alan araştırmacılar için çok disiplinli bir zemin sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- ASTM International. (2020). ISO/ASTM 52900:2020 Additive manufacturing — General principles — Terminology.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- Chen, Y., & Chen, L. (2020). Multi-parameter optimization of fused deposition modeling for mechanical properties enhancement. *Journal of Manufacturing Processes*, 48, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.011>
- Crump, S. S. (1992). Apparatus and method for creating three-dimensional objects (US Patent No. 5121329).
- FlashForge. (2020). *Creator Pro 3D Printer User Manual*. FlashForge Official Documentation.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct dijitali manufacturing* (3rd ed.). Springer.
- Gurralla, P. K., & Regalla, S. P. (2020). Influence of FDM process parameters on the mechanical properties and quality of 3D printed parts: A review. *Materials Today Communications*, 23, 100854. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100854>
- Hull, C. W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography (US Patent No. 4575330).
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425.
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770–1773.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals*, 47(2), 525–540.
- Kumar, S., Singh, R., & Singh, D. (2020). Recent advances in FDM process parameters and materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 3220–3225. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.723>

- Lee, H., Kim, S., & Lee, J. (2022). Effects of printing speed on surface roughness and mechanical properties in FDM 3D printing. *Additive Manufacturing*, 50, 102584. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102584>
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Wiley.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Patel, D., & Sharma, A. (2020). Effect of shell thickness on mechanical properties of FDM parts. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1281–1286. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.324>
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., & Marinescu, R. (2018). FDM 3D printing technology: Influence of printing parameters on mechanical properties of polymer parts. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 80(2), 97–104.
- Raigond, P., Chandel, A. K., & Srivastava, R. (2021). Recycling of polymers in additive manufacturing: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00279. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00279>
- Rashid, K., Xie, S., & Wysk, R. A. (2021). Thermal degradation and mechanical performance of FDM printed PLA: Effects of extrusion temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 186, 109492. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109492>
- Singh, R., & Singh, D. (2017). Effect of process parameters on mechanical properties of FDM printed parts: A review. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(4), 104–112.
- Singh, S., & Pandey, A. K. (2021). Influence of layer thickness on tensile strength and surface roughness of 3D printed PLA specimens. *Materials Research Express*, 8(9), 095304. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac16a3>
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.027>
- Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. (2015). An approach for mechanical property optimization of FDM parts. *Rapid Prototyping Journal*, 21(4), 556–570. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2014-0073>
- Tümer, M., & Kaynak, Y. (2019). Effect of infill percentage on the mechanical properties of FDM printed parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 229–239. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03823-5>
- Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192–204. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2013-0012>

- Ventola, C. L. (2014). *Medical applications for 3D printing: Current and projected uses. Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704–711.
- Wang, Y., Zhang, Y., & Yan, C. (2019). *Optimization of FDM process parameters based on artificial intelligence methods: A review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2961–2977. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03716-5>
- Yılmaz, B., Güler, H., & Korkmaz, O. (2021). *Türkiye’de katmanlı imalat teknolojilerinin gelişimi. Uluslararası Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 45–58.
- Zhao, Y., Wang, S., & Zhang, X. (2019). *Effects of layer thickness and printing speed on mechanical properties of PLA fabricated by fused deposition modeling. Rapid Prototyping Journal*, 25(6), 1086–1093. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2018-03>



## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Kocaeli Gebze’ de tamamladı. 2015 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümünden 2021 yılında mezun oldu. 2021 yılından beri özel sektörlerde çalışmaktadır.

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

- [1] Balıkcı, F., Orhun, T., Sepetçioğlu, H., Karagöz, İ., (2025). “FDM 3D Baskı Teknolojisinde Optimal Parametrelerin Belirlenmesi ve Parça Kalitesinin Analizi: Sistematik Bir İnceleme ve Pratik Uygulamalar”, presented at 5. Uluslararası Lisansüstü Çalışmalar Kongresi, 25-28 Haziran, Online.

