



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DOLGU AÇISININ ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ
MALZEMELERİN MEKANİK VE KIRILMA
KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ**

Bilal KAY

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DOLGU AÇISININ ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ
MALZEMELERİN MEKANİK VE KIRILMA
KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ**

Bilal KAY

**Danışman
Doç. Dr. Tolga TOPKAYA**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Bilal KAY tarafından hazırlanan “Dolgu Açısının Üç Boyutlu Yazıcı İle Üretilmiş Malzemelerin Mekanik ve Kırılma Karakteristiğine Etkisi” adlı tez çalışması 26/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Tolga TOPKAYA

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

İmza
Bilal KAY
Tarih:26.08.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU AÇISININ ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ MALZEMELERİN MEKANİK VE KIRILMA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ

Bilal KAY

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tolga TOPKAYA

2025, 39 Sayfa

Eriyik Yığılma Metodu (EYM), düşük maliyeti, kullanıcı dostu yapısı ve çok çeşitli termoplastik polimerlerle uyumluluğu sayesinde hem endüstride hem de akademide yaygın olarak kullanılan bir katmanlı imalat tekniğidir. Ancak, EYM yöntemiyle üretilen parçalar genellikle baskı parametrelerine bağlı olarak anizotropik (yönelimli) mekanik özellikler sergilemektedir. Bu çalışma, EYM yöntemiyle üretilen PLA (Polilaktik Asit) numunelerde baskı yöneliminin kırılma davranışı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemektedir.

Farklı baskı yönelimlerinde (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) üretilen numunelere tek eksenli çekme, eğilme ve Çentikli Kiriş (SENB) testleri uygulanarak kırılma davranışları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, baskı yöneliminin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve gerilme yoğunluk faktörü üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yükleme yönüne paralel olarak basılan numuneler daha yüksek mekanik performans sergilerken, dik yönde basılan numunelerde katmanlar arası zayıf bağlanma nedeniyle gevrek kırılma davranışı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eriyik Biriktirme Yöntemi, PLA, Kırılma Davranışı, Baskı Oryantasyonu, Katmanlı İmalat

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF INFILL DIRECTION ON THE MECHANICAL AND FRACTURE CHARACTERISTICS OF 3D PRINTED MATERIALS

Bilal KAY

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tolga TOPKAYA

2025, 39 Pages

Fused Deposition Modeling (FDM) is a widely adopted additive manufacturing method, favored in both industrial and academic fields due to its affordability, ease of operation, and compatibility with a variety of thermoplastic materials. Despite its advantages, components produced via FDM often exhibit anisotropic mechanical behavior influenced by printing parameters. This study experimentally examines how print orientation affects the fracture behavior of PLA (Polylactic Acid) specimens fabricated using FDM.

Samples were printed at various orientation angles (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°) and tested under uniaxial tensile, flexural, and Single Edge Notched Beam (SENB) loading to observe fracture modes. The findings show that print orientation has a significant impact on tensile strength, flexural strength, and fracture toughness. Specimens printed parallel to the load direction demonstrated enhanced mechanical performance, whereas those printed perpendicular to it experienced brittle failure due to weak interlayer adhesion.

Keywords: Fused Deposition Modeling, PLA, Fracture Behavior, Print Orientation, Additive Manufacturing

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmam süresince, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Tolga TOPKAYA'ya; çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen değerli kardeşim İhsan ERBEK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yaşamımın her anında yanımda olan, bana maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen sevgili aileme sonsuz minnet ve sevgilerimi ifade etmek isterim.

Bilal KAY
BATMAN-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi	3
1.2. Çalışmanın Varsayımları ve Sınırlılıkları	4
1.3. Çalışmanın Problemleri	4
1.4. Tezin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarıyla İlişkisi ve Katkısı	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Yenilikçi İmalat Yöntemleri	6
2.1.1. Tanımı ve tarihsel gelişimi	6
2.1.2. Başlıca yenilikçi imalat yöntemleri	7
2.1.2.1. Eklemeli imalat (Additive Manufacturing).....	7
2.1.2.2. Hızlı prototipleme	7
2.1.2.3. Akıllı imalat (Smart Manufacturing)	7
2.1.2.4. Robotik üretim	8
2.1.2.5. Biyoyazıcılar (Bioprinting).....	8
2.1.2.6. Dijital ikiz (Digital Twin)	8
2.1.2.7. Sürdürülebilir üretim yöntemleri	8
2.1.2.8. Hibrit imalat sistemleri	8
2.1.2.9. Yapay zekâ ve imalat 4.0	9
2.1.3. Uygulama alanları.....	9
2.1.4. Avantajları	9
2.1.5. Zorluklar ve sınırlılıklar	9
2.1.6. Geleceğe yönelik beklentiler	10
2.2. Üç Boyutlu Yazıcı ile İmalat	10
2.2.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin tanımı ve tarihçesi	11
2.2.2. Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan temel teknolojiler.....	11
2.2.2.1. Fused deposition modeling (FDM).....	11
2.2.2.2. Stereolithography (SLA).....	11
2.2.2.3. Selective laser sintering (SLS).....	12
2.2.3. Kullanılan malzemeler	12
2.2.4. Üretim süreçlerinde 3B yazıcıların rolü.....	12
2.2.5. Endüstriyel uygulamalar	12
2.2.5.1. Otomotiv sektörü	12
2.2.5.2. Havacılık ve uzay sanayii	13

2.2.5.3. Tıp ve biyomedikal alanlar	13
2.2.5.4. İnşaat ve mimarlık	13
2.2.6. Üç boyutlu yazıcının avantajları ve dezavantajları	13
2.2.7. Gelecek perspektifi	13
2.3. Kırılma Mekanikliği.....	14
2.3.1. Kırılma mekanikliği temelleri.....	14
3. YÖNTEM	16
3.1. Numunelerin Üretilmesi	16
3.1.1. Kullanılan PLA malzemenin özellikleri	16
3.1.2. Baskı işlemi.....	16
3.2. Çekme Testleri.....	19
3.3. Eğilme Testleri.....	21
3.4. Kırılma Testleri.....	22
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	24
4.1. Çekme Test Sonuçları.....	24
4.2. Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları	28
4.3. Tek Kenarı Çentikli Kiriş (Senb) Test Sonuçları.....	29
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	33
5.1. Sonuçlar	33
5.2. Öneriler	34
KAYNAKLAR	35

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. PLA Filamentin özellikleri	16
Tablo 3.2. 3 Boyutlu baskı özellikleri.....	17



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. FDM Tekniğinin şematik gösterimi	2
Şekil 3.1. Creality ender 3 V3 SE yazıcı	17
Şekil 3.2. Üretilen numunelerin ultimaker cura arayüzünde görünümü.....	19
Şekil 3.3. Üretilen numunelerin creality ender 3 v3 se tablasındaki görüntüsü	19
Şekil 3.4. Çekme test numunesi boyutları	20
Şekil 3.5. Shimadzu universal test cihazı	21
Şekil 3.6. Eğilme test numunesi boyutları.....	21
Şekil 3.7. Kırılma test numunesi boyutları	22
Şekil 3.8. Kırılma test numunesi çatlak boyu ölçümü.....	23
Şekil 4.1. 0 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	24
Şekil 4.2. 15 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	25
Şekil 4.3. 30 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	25
Şekil 4.4. 45 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	26
Şekil 4.5. 60 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	26
Şekil 4.6. 75 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	27
Şekil 4.7. 90 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü.....	27
Şekil 4.8. Çekme testleri neticesinde elde edilen ortalama hasar yükleri ve standart sapmalar	28
Şekil 4.9. Üç nokta eğilme testleri neticesinde hasar yükünün oryantasyon açısı ile değişimi.....	29
Şekil 4.10. SENB testleri neticesinde elde edilen uygulanan kuvvet – şekil değişimi grafiği.....	29
Şekil 4.11. SENB testleri neticesinde hasar yükünün oryantasyon açısı ile değişimi....	30
Şekil 4.12. Gerilme yoğunluk faktörü (kq) değerinin oryantasyon açısı ile değişimi....	31
Şekil 4.13. SENB testleri sonrasında hasar görmüş numuneler	32

KISALTMALAR

Kısaltmalar

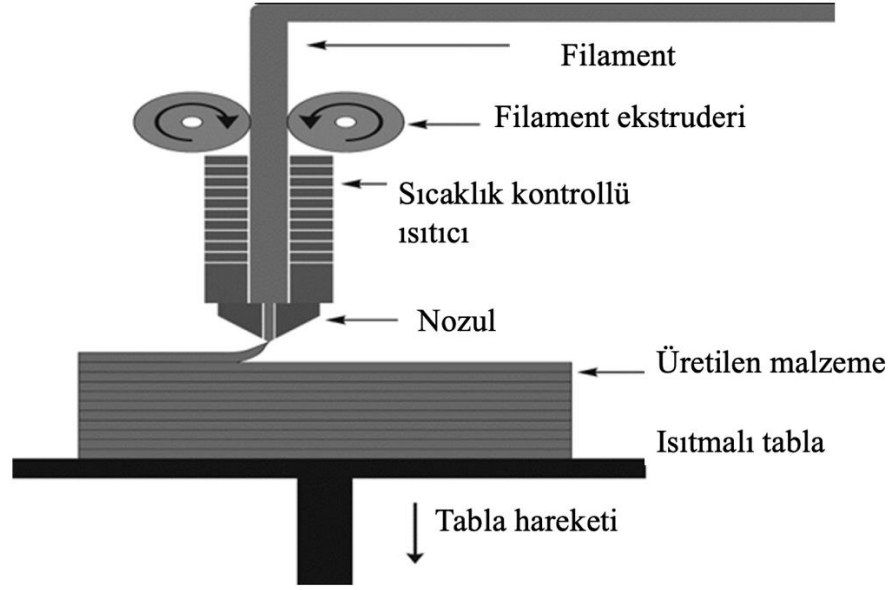
YİY	Yenilikçi İmalat Yöntemleri
IoT	Nesnelerin İnterneti
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modelling
PC	Poli Carbonat
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
PLA	Poli Laktik Asit
SNB	Single-Edge Notched Beam
HP	Hızlı Prototipleme
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
CAM	Computer Aided Manufacturing
AM	Additive Manufacturing
SM	Smart Manufacturing

1. GİRİŞ

21. yüzyılın üretim endüstrisinde yaşanan hızlı değişim ve dönüşüm, geleneksel imalat yöntemlerinin yetersizliğini ortaya koyarak, daha esnek, daha hızlı ve daha verimli üretim yaklaşımlarının doğmasına neden olmuştur. Küresel rekabetin yoğunlaştığı günümüzde, firmalar sadece kaliteli ürün üretmekle yetinmemekte, aynı zamanda üretim süreçlerini de optimize ederek zaman ve maliyet avantajı elde etmeye çalışmaktadırlar. Bu bağlamda, yenilikçi imalat yöntemleri (YİY), üretimdeki paradigma değişimini simgelemekte ve endüstriyel üretimde devrim niteliğinde fırsatlar sunmaktadır.

Yenilikçi imalat yöntemleri; ürün tasarımından başlayarak, üretim sürecine ve son kullanıcıya ulaşana kadar tüm aşamalarda teknolojik gelişmelerin kullanılması ile üretimde verimliliği ve esnekliği artırmayı amaçlamaktadır. Özellikle Endüstri 4.0 ile daha da önem kazanan bu yöntemler, dijitalleşmenin etkisiyle otomasyon, yapay zekâ, büyük veri analitiği ve nesnelerin interneti (IoT) gibi kavramlarla entegre olarak kullanılmaktadır.

Erimiş Biriktirme Modellemesi (FDM), 1980'lerde icat edilen malzeme ekstrüzyonuna dayalı bir eklemeli imalat yöntemidir (Dudek, 2013). Erimiş ince filamentlerin ısıtılmış yazıcı yatağı üzerine katman katman yerleştirilmesiyle çalışır (Dudek, 2013). Günümüzde FDM, doğruluk ve uygun maliyet gibi avantajlarından dolayı en popüler hızlı prototipleme tekniklerinden biridir. FDM tekniğinin çalışma prensibi aşağıda şematik olarak verilmiştir. Baskı hızı, katman kalınlığı, baskı sıcaklığı, dolum oranı, baskı yönü, destek yapısı vb. dahil olmak üzere yazdırma parametrelerinin tümü dilimleme yazılımında ayarlanır. Modelleme işlemi sırasında, bir baskı filamanı yarı sıvı halde ağızlığa ekstrüde edilir ve Şekil 1.1'de gösterilen önceki malzeme katmanının üzerine biriktirilir. Yeni malzeme katmanı, oda sıcaklığında baskı nesnesi üzerinde katılaştıktan sonra, baskı platformu ile baskı platformu yazdırma ögesi bir malzeme katmanının yüksekliği kadar aşağı doğru hareket eder ve ardından bir sonraki malzeme katmanı yazdırılır. Bu işlem modelin tamamı basılana kadar devam eder ve sonunda destek yapısı manuel olarak kaldırılır.



Şekil 1. 1. FDM Tekniğinin şematik gösterimi

FDM tekniği ile üretilen numunelerin kalitesini çeşitli parametreler etkileyebilir. Örneğin Camargo vd. (2019), katman kalınlığının arttırılmasının, 3D baskılı parçaların çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti ve darbe enerjisi dahil olmak üzere mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca Ayatollahi vd. (2020), daha yüksek baskı hızlarında mikro boşlukların bir sonraki katman tarafından doldurulduğunu ve bunun da katmanlar arasında daha iyi yapışma sağlanmasına yardımcı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, baskı hızının arttırılmasıyla, biriktirilen katmanın bir sonraki üst katmanın uygulanmasından önce katılaşması için daha az zaman kalır, böylece katmanlar arasında daha yüksek mekanik kenetlenme sağlanır. FDM prosesinde çok çeşitli malzemeler kullanılabilir ancak Polikarbonat (PC), Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Poli-laktik asit (PLA) gibi farklı ticari polimerler düşük erime sıcaklıklarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Wu vd., 2015). Poli-laktik asit (PLA), tıbbi cihazlar ve plastik şişeler gibi geniş mühendislik uygulamalarına sahip biyo-plastik bir malzeme olarak bilinmektedir. FDM'nin üretim prensiplerine göre malzeme katmanları farklı yönlerde eklenir, dolayısıyla parçalar farklı yönlerde farklı mekanik davranışlar sergileyebilir. Bu nedenle FDM tekniği ile üretilen parçaların mühendislik uygulamalarında daha güvenli kullanılabilmesi için bu malzemelerin yapısal bütünlüğünün araştırılması gerekmektedir. Aşağıda bu konuyla ilgili geçmişte yapılan araştırmalardan bazıları yer almaktadır.

Hill vd. (2014) FDM numunelerinin fiber takviyeli kompozitlere benzer davrandığını bulmuş ve mekanik davranışlarını incelemek için aynı formülasyonun

kullanılmasını önermiştir. Dolgu açısının, FDM numunelerinin nihai gerilme mukavemetini ve kopma uzamasını önemli ölçüde etkilediğini ancak Young modülünü etkilemediğini bildirmişlerdir. Hart ve Wetzel (2017), tek kenarlı çentik eğme (SENB) numunelerini kullanarak, tabaka yöneliminin FDM-ABS parçalarının kırılma tokluğu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmalarında, yatay olarak yönlendirilen numunelerde kırılma yükleri, dikey olarak yönlendirilen numunelerden daha yüksek değerler almıştır. Ayrıca dikey ve yatay yöndeki numunelerde sırasıyla gevrek ve sünek kırılma davranışları gözlemlenmiştir. Aliheidari vd. (2017) FDM-ABS numunelerinin kırılma direncini ve katmanlar arası yapışmasını değerlendirmek için çift konsol kirişleri kullanmıştır. Sonuçlar, katmanlar arası kırılma direncinin ABS'nin görünen kırılma direncinden daha fazla olduğunu ortaya çıkarmıştır. Lanzillotti ve arkadaşları tarafından ABS'den yapılmış SENB numuneleri üzerinde karışık mod I-II kırılma testleri yapılmıştır (Lanzillotti, 2019). Gerilim yoğunlaşma bölgelerindeki baskı yolunu, filamanların çatlak ucunda yükleme yönünde hareket edecek şekilde değiştirilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada dolgu olarak kullanılan yapının 3 boyutlu yazıcı ile üretilen malzemelerin mekanik ve kırılma davranışlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Mühendislik yapılarının oluşturulmasında temel kriterler işlevsellik, ekonomiklik ve mukavemettir. Yapının kullanım amacına göre tasarlanan malzemelerin minimum maliyetle maksimum dayanım değerlerine sahip olması istenir. Bu nedenle malzemelerin bu üç kriteri optimum düzeyde sağlaması için araştırmalar yapılmaktadır.

Gelişen teknoloji ile özellikle kolay imalat ve ekonomik üretim fırsatları nedeniyle farklı üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Son yıllarda eklemeli imalat mühendisler için büyük fırsatlar sunmaktadır. 3D baskı (3DB), bilgisayar destekli 3D modellemeye dayanan ürünlerin hızlı prototipleme (HP) tekniklerinden biridir (Yao vd., 2019). Aynı zamanda başarılı ve verimli son ürünler için başlangıç ve etkili bir tasarım sürecini mümkün kılar (Primo vd., 2017). Sonuç olarak üretim sürecinde malzeme tasarrufunda itici güç olarak ön plana çıkmaktadır (Pakkanen vd., 2017). 3DB teknolojisinin birçok endüstrideki üretim uygulamalarında devrim yaratabileceği araştırmacılar tarafından öne sürülmüştür (Turner vd., 2015; Parandoush ve Lin, 2017). Günümüzde 3D baskı teknolojisi imalat (Berman, 2012; Wang vd., 2020), inşaat mühendisliği (Wolfs vd., 2018; Panda vd., 2019), otomotiv mühendisliği (Talagani vd.,

2015) biyomedikal mühendisliği (Do vd., 2015), gıda (Godoi vd., 2016; Sun vd., 2015; Lipton vd., 2015), giyim (Wang ve Chen, 2014), alanlarında yaygın olarak uygulanmaktadır.

Literatür incelendiğinde 3 boyutlu yazıcı ile imalatın özellikle kolay prototipleme ve ekonomik üretim avantajlarının birçok araştırmacı tarafından araştırıldığı ve geliştirilmeye çalışıldığı görülmüştür. 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmaların sınırlı olması özellikle malzeme mukavemetine önemli etkisi olan filament malzeme doğrultusunun mekanik özellikleri nasıl etkileyeceğinin araştırıldığı çalışma sayısı sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür. Bu nedenle dolgu malzemesi doğrultusunun 3 boyutlu yazıcı ile imal edilen malzemelerin mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması çalışmasının literatürde yer alan bir boşluğu doldurma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

1.2. Çalışmanın Varsayımları ve Sınırlılıkları

Çalışmada dolgu malzemesi yönelim açısına bağlı olarak mukavemet değişimi gözleneceği varsayımı literatür çalışmalarının ışığında yapılmıştır. Dolgu malzemesi yönelim açısının mekanik özelliklere etkisinin tespit edilmesi planlanmıştır. Sınırlı bütçe nedeniyle üretilen numunelerde dolgu malzemesi yönelim açısı olarak 0, 15, 35, 45, 60, 75 ve 90 kullanılmıştır. Kullanılacak farklı açısı sayısının arttırılamaması çalışmanın temel kısıtı olarak görülmektedir.

1.3. Çalışmanın Problemleri

Bu tez çalışmasının temel araştırma sorusu, üç boyutlu yazıcı teknolojisi ile üretilen malzemelerde, baskı sırasında kullanılan dolgu malzemesinin yönelim açısının, elde edilen ürünün mekanik dayanımı ve kırılma mekaniği gibi yapısal özellikleri üzerindeki etkisinin ne ölçüde belirleyici olduğunu ortaya koymaktır. Çalışma sonuçları ile FDM tekniği kullanılarak üretilen malzemelerde mekanik ve kırılma mekaniği özellikleri fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri gibi takviye/dolgu yönelim açısı ile değişir mi? Sorusuna da cevap aranmıştır.

1.4. Tezin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarıyla İlişkisi ve Katkısı

Tez çalışması Birleşmiş Milletler Genel Kurulu tarafından kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarından Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı ile ilişkilidir. Yenilikçi imalat teknolojilerinden olan üç boyutlu yazıcı ile imalat tekniği ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve optimizasyonu daha verimli ve sürdürülebilir malzeme üretimine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dünya nüfusunun hızla artması, ihtiyaç duyulan ürün ve hizmetlerin miktarında da önemli bir artışı beraberinde getirmiştir. Bu artan talebi karşılayabilmek adına üretim süreçlerinin hem hızlandırılması hem de geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu doğrultuda, üretim teknolojilerinde ve ürün tasarımlarında yenilikçi yaklaşımlara olan ilgi giderek artmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık gibi rekabetin yoğun olduğu sektörlerde, tasarımların hafifletilmesi günümüzde büyük önem taşımaktadır. Her ne kadar geçmişte bu konuda çeşitli girişimler olsa da üretim tekniklerinin sınırlılıkları nedeniyle yenilikçi tasarımlar istenen düzeyde uygulanamamıştır. Rekabet avantajı elde edebilmek için ürün geliştirme süreçlerinin mümkün olduğunca hızlı tamamlanması gerekmektedir. Bu noktada bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve analiz araçları, sürecin verimli yönetilmesini sağladığı için artık şirketler açısından vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir.

2.1. Yenilikçi İmalat Yöntemleri

Yenilikçi imalat yöntemleri, geleneksel üretim tekniklerine kıyasla daha ileri teknolojiler kullanan, üretim sürecinde yüksek esneklik, kişiselleştirme ve düşük maliyet sağlayan yöntemlerdir. Bu yöntemler arasında başlıca olarak eklemeli imalat (3D yazıcı teknolojisi), akıllı imalat sistemleri, robotik üretim, biyoyazıcılar, lazer sinterleme, hızlı prototipleme, dijital ikiz teknolojisi ve sürdürülebilir üretim teknikleri bulunmaktadır.

2.1.1. Tanımı ve tarihsel gelişimi

Tarihsel olarak bakıldığında, imalatta yenilikçilik kavramı Sanayi Devrimi ile ivme kazanmış, ancak özellikle 20. yüzyılın sonlarına doğru bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli üretim (CAM) ve otomasyon teknolojilerinin gelişmesiyle hızla yaygınlaşmıştır. 1980'li yıllarda ilk 3D yazıcıların geliştirilmesiyle eklemeli imalat kavramı doğmuş, 2000'li yıllardan sonra ise dijital dönüşümle birlikte bu alandaki gelişmeler artmıştır (Gibson vd., 2021; Wong vd., 2012).

2.1.2. Başlıca yenilikçi imalat yöntemleri

2.1.2.1. Eklemeli imalat (Additive Manufacturing)

Eklemeli imalat, katmanlı üretim olarak da bilinir ve malzemenin katman katman üst üste eklenmesiyle nesnenin üretilmesini sağlar. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde büyük avantajlar sağlar. Eklemeli imalat, 3B baskı teknolojileriyle malzemelerin katman katman birleştirilmesi prensibine dayanır. Özellikle titanyum alaşımları ve kompozit malzemeler gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor malzemelerde devrim yaratmıştır (Guo ve Leu, 2013). Örneğin, lazer sinterleme (SLM) tekniğiyle üretilen tıbbi implantlar, hastaya özel tasarım avantajı sunmaktadır (Murr vd., 2010). Ancak, bu yöntemin enerji tüketimi ve yüzey kalitesi gibi sınırlılıkları da bulunmaktadır. Gev vd. (2017), enerji optimizasyonu için makine öğrenmesi tabanlı modeller önermiştir.

Eklemeli imalatın türleri:

- FDM (Fused Deposition Modeling)
- SLA (Stereolithography)
- SLS (Selective Laser Sintering)
- EBM (Electron Beam Melting) (Atzeni vd., 2010).

2.1.2.2. Hızlı prototipleme

Bu teknik, ürünlerin prototiplerinin kısa sürede üretilmesini sağlar. Ürün geliştirme sürecini hızlandırmak için kullanılır ve maliyetleri önemli ölçüde düşürür (Gibson vd., 2021).

2.1.2.3. Akıllı imalat (Smart Manufacturing)

Siber-fiziksel sistemlerin kullanıldığı, makinelerin kendi aralarında iletişim kurabildiği, veri analitiği ile üretimin optimize edildiği bir yöntemdir. Akıllı fabrikalar, üretim hatlarını sürekli olarak optimize edebilen sistemlere sahiptir (Girgin ve Yılmaz, 2022).

2.1.2.4. Robotik üretim

Robotlar, insan gücünü azaltmak ve üretim hatasını minimize etmek amacıyla kullanılır. Özellikle otomotiv ve elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılır (Pisková vd., 2023).

2.1.2.5. Biyoyazıcılar (Bioprinting)

Canlı hücrelerin kullanıldığı bu teknoloji, tıp alanında devrim yaratmaktadır. Doku ve organ üretimi, ilaç testleri için biyolojik örneklerin yazdırılması gibi uygulamaları vardır (Huang vd., 2019).

2.1.2.6. Dijital ikiz (Digital Twin)

Fiziksel bir varlığın dijital kopyasının oluşturulmasıdır. Üretim sürecinde sanal simülasyonlar yaparak sistemlerin izlenmesini ve optimize edilmesini sağlar (Crespi vd., 2023).

2.1.2.7. Sürdürülebilir üretim yöntemleri

Doğaya zarar vermeyen, enerji verimliliğini ön planda tutan çevreci üretim teknikleridir. Geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı bu yaklaşımın önemli bir parçasıdır (Turhan vd., 2018). Sürdürülebilir imalat, geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı ve enerji verimliliği odaklıdır. Örneğin, soğuk sprey (cold spray) tekniği, metal tozlarının yüksek hızda birleştirilmesiyle atık malzemelerin yeniden kullanımını mümkün kılar (Grigoriev vd., 2015). Ayrıca, Avrupa Birliği'nin Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020) belgesi, bu alandaki politikaları desteklemektedir.

2.1.2.8. Hibrit imalat sistemleri

Hibrit imalat, eklemeli ve çıkarmalı (subtractive) yöntemlerin entegrasyonudur. Örneğin, direkt enerji biriktirme (DED) ile üretilen parçaların CNC tezgâhlarda son işleme tabi tutulması hem hızlı prototipleme hem de yüksek tolerans sağlar (Möhring vd.,

2020). Bu alanda yapılan bir çalışmada, hibrit sistemlerin havacılık sektöründeki maliyetleri %30 azalttığı kanıtlanmıştır (Badiru vd., 2017).

2.1.2.9. Yapay zekâ ve imalat 4.0

Yapay zekâ (YZ), üretim süreçlerinde hata tespiti, kalite kontrol ve kaynak optimizasyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır. Örneğin, tahmine dayalı bakım (predictive maintenance) sistemleri, makine arızalarını önceden tespit ederek üretim kayıplarını önler (Tao vd., 2018). YZ'nin etik ve istihdam üzerindeki etkileri ise tartışmalıdır. Schwab vd. (2017), bu teknolojinin işgücünde radikal değişimlere yol açacağını savunmaktadır.

2.1.3. Uygulama alanları

Yenilikçi imalat yöntemleri günümüzde pek çok sektörde kullanılmaktadır:

- Otomotiv: Hafif yapı elemanlarının üretimi, özelleştirilmiş parçalar (Zhou vd., 2020).
- Havacılık ve Uzay: Ağırlık azaltma, parça konsolidasyonu (Wong vd., 2012).
- Sağlık: Kişiyeye özel protezler, implantlar, biyoyazıcı ile organ üretimi (Huang vd., 2019).
- İnşaat: 3D baskılı yapılar, modüler üretim (Gibson vd., 2021).
- Moda ve Takı: Özgün tasarımlar, hızlı üretim (Atzeni vd., 2010).

2.1.4. Avantajları

- Tasarım özgürlüğü
- Hızlı prototipleme
- Kişiselleştirilmiş üretim
- Daha az atık
- Karmaşık geometrilerin üretimi

2.1.5. Zorluklar ve sınırlılıklar

- Malzeme çeşitliliği sınırlılığı

- Yüksek donanım maliyeti
- Eğitimli iş gücüne ihtiyaç
- Kalite kontrol süreçlerinin zorlaşması
- Yasal ve standart eksiklikler

2.1.6. Geleceğe yönelik beklentiler

Yenilikçi imalat yöntemlerinin geleceği, yapay zekâ, makine öğrenimi, IoT ve ileri robotik sistemlerle entegre çalışmasıyla şekillenecektir. Üretim süreçleri daha otonom hale gelecek, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik ön planda olacak, bireyselleştirilmiş üretim yaygınlaşacaktır.

Yenilikçi imalat yöntemleri, üretim süreçlerini yeniden şekillendiren, verimliliği artıran ve tasarımda devrim yaratan tekniklerdir. Sanayinin dijitalleşme yolunda attığı bu adımlar, üretimde hız, esneklik ve sürdürülebilirlik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin yaygınlaşabilmesi için altyapı yatırımları, eğitim programları ve yasal düzenlemeler gibi birçok unsurun da geliştirilmesi gerekmektedir.

2.2. Üç Boyutlu Yazıcı ile İmalat

Son yıllarda gelişen teknolojiler arasında en dikkat çekenlerden biri olan üç boyutlu yazıcılar, üretim süreçlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Bu teknoloji, dijital ortamda tasarlanan bir nesnenin katmanlar halinde fiziksel olarak üretilmesini sağlamaktadır. Yalnızca prototipleme süreçlerinde değil, nihai ürün üretiminde de kullanılabilmesi sayesinde endüstriyel üretimin doğasını değiştirmiştir. Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojileri, dijital tasarımları katman katman fiziksel nesnelere dönüştürerek imalat sektöründe devrim yaratmıştır. Bu teknoloji, eklemeli imalat (additive manufacturing) olarak adlandırılır ve kişiselleştirilmiş üretim, karmaşık geometrili parçaların üretimi ve malzeme verimliliği gibi avantajlar sunar (Gibson vd., 2021). Sanayi 4.0'ın bir parçası olarak 3B yazıcılar, akıllı fabrikaların ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (Ford ve Despeisse, 2016). Bu başlık altında üç boyutlu yazıcılarla imalat süreci, kullanılan teknolojiler, malzemeler, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajları ile ele alınmıştır.

2.2.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin tanımı ve tarihçesi

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak hazırlanan dijital modellerin katman katman üretilmesi prensibine dayanan bir imalat yöntemidir (Berman, 2012). Bu teknoloji ilk olarak 1980'lerin ortalarında Hull (1984) tarafından geliştirilen stereolitografi (SLA) yöntemi ile gündeme gelmiştir. 1986 yılında Hull'un 3D Systems adındaki şirketi kurarak ticari SLA yazıcısını piyasaya sürmesiyle teknolojinin yaygınlaşması başlamıştır (Lipson ve Kurman, 2013). 1990'larda seçici lazer sinterleme (SLS) ve füzyon biriktirme modellemesi (FDM) gibi yöntemlerin ortaya çıkmasıyla birlikte, bu teknoloji endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmaya başlamıştır (Gibson vd., 2015).

Başlangıçta yalnızca prototipleme için kullanılan bu teknoloji, zamanla malzeme çeşitliliğinin artması, yazıcı hızlarının yükselmesi ve maliyetlerin düşmesi sayesinde seri üretimde kullanılabilir hale gelmiştir. Günümüzde özellikle endüstriyel üretimde, bireysel kullanımda ve sağlık sektöründe önemli bir yere sahiptir.

2.2.2. Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan temel teknolojiler

2.2.2.1. Fused deposition modeling (FDM)

FDM teknolojisi, eriyebilen bir termoplastik filamentin eritilerek katman katman bir yapı oluşturulması esasına dayanır. Bu yöntem en yaygın kullanılan 3B baskı teknolojilerinden biridir. Ucuzluğu, kullanıcı dostu olması ve geniş malzeme yelpazesi sayesinde hem bireysel hem de endüstriyel kullanımda tercih edilmektedir (Gibson vd., 2015).

2.2.2.2. Stereolithography (SLA)

SLA teknolojisi, ışığa duyarlı reçinenin lazer ışını ile sertleştirilmesiyle çalışan bir sistemdir. UV ışığıyla sertleşen reçinelerin kullanıldığı bu yöntem, yüksek detaylı baskılar için uygundur (Hull, 1984). Bu teknoloji, yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi sunması nedeniyle özellikle dental ve takı sektörlerinde tercih edilmektedir. Ancak maliyeti FDM'e kıyasla daha yüksektir (Ngo vd., 2018).

2.2.2.3. Selective laser sintering (SLS)

SLS, toz halindeki malzemenin yüksek güçlü lazer ile eritilerek birleştirilmesini sağlar. Bu teknoloji, özellikle metal ve seramik malzemelerle çalışmak isteyen sanayi kuruluşları için uygundur. Yüksek mukavemetli parçaların üretiminde tercih edilir (Kruth vd., 2007).

2.2.3. Kullanılan malzemeler

3B yazıcı teknolojilerinde kullanılan malzemeler, üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Termoplastikler (PLA, ABS), fotopolimer reçineler, metal tozları (alüminyum, titanyum), seramikler ve biyolojik malzemeler bu alanda sıkça tercih edilmektedir. Malzeme seçiminde üretilecek parçanın dayanımı, esnekliği, ısıya dayanıklılığı gibi kriterler belirleyicidir (Chua ve Leong, 2016).

2.2.4. Üretim süreçlerinde 3B yazıcıların rolü

Üç boyutlu yazıcılar, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla esnekliği ve hız avantajı ile öne çıkmaktadır. Kalıp gereksinimi olmaksızın üretim yapılabilmesi, küçük ölçekli kişiselleştirilmiş üretimlerin maliyet etkin şekilde gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca hızlı prototipleme imkânı, ürün geliştirme süresini kısaltmaktadır (Rayna ve Striukova, 2016).

2.2.5. Endüstriyel uygulamalar

2.2.5.1. Otomotiv sektörü

Otomotiv sanayisinde prototip üretimi, özel yedek parça imalatı ve hafif yapılar elde etmek amacıyla üç boyutlu yazıcılardan yaygın olarak yararlanılmaktadır. BMW, Ford ve Volkswagen gibi firmalar üretim süreçlerine bu teknolojiyi entegre etmiştir (Gao vd., 2015).

2.2.5.2. Havacılık ve uzay sanayii

Bu sektörde özellikle yüksek dayanımlı, hafif parçaların üretiminde üç boyutlu yazıcılar kritik rol oynamaktadır. Hafif ve dayanıklı parça üretimi için 3B yazıcılar kullanılmaktadır. NASA, uzay görevlerinde bu teknolojiye yararlanmaktadır (NASA, 2020).

2.2.5.3. Tıp ve biyomedikal alanlar

Ortopedik implantlar, kişiye özel protezler, cerrahi rehberler ve biyoyazıcılar aracılığıyla dokuların üretimi gibi birçok alanda 3B yazıcılar kullanılmaktadır. Biyouyumlu malzemelerin gelişmesiyle birlikte bu alan daha da genişlemektedir (Ventola, 2014). Protezler, dental implantlar ve hatta organ baskısı (biyoyazıcılar) gibi uygulamalar mevcuttur (Melchels vd., 2012).

2.2.5.4. İnşaat ve mimarlık

Son yıllarda beton ve diğer yapı malzemeleri ile çalışan büyük ölçekli 3B yazıcılar geliştirilmiştir. Bu sayede bina yapımı gibi alanlarda daha hızlı, ekonomik ve çevreci çözümler mümkün hale gelmiştir (Bos vd., 2016).

2.2.6. Üç boyutlu yazıcının avantajları ve dezavantajları

Avantajlar arasında hızlı üretim, düşük maliyet, kişiselleştirme imkânı, daha az atık üretimi ve karmaşık geometrilerin kolayca üretilebilmesi sayılabilir. Ancak sınırlı malzeme dayanımı, yüzey kalitesi sorunları, düşük üretim hızı ve bazı teknolojilerin yüksek maliyeti gibi dezavantajlar da mevcuttur (Gebler vd., 2014).

2.2.7. Gelecek perspektifi

Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin gelecekte daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Yapay zekâ ile entegre edilmiş yazıcılar, otonom üretim süreçleri, in-situ üretim kontrol sistemleri gibi gelişmelerle daha akıllı ve verimli üretim sistemleri ortaya çıkacaktır.

Ayrıca malzeme bilimi ile yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesi, bu teknolojinin sınırlarını daha da genişletecektir (Ford ve Despeisse, 2016).

Özetle üç boyutlu yazıcı teknolojisi, üretim dünyasında köklü değişikliklere yol açan yenilikçi bir imalat yöntemidir. Bu teknoloji ile kişiselleştirilmiş, hızlı ve ekonomik üretim mümkün hale gelmiştir. Özellikle otomotiv, havacılık, tıp ve mimari gibi alanlarda sağladığı avantajlar, üç boyutlu yazıcıların vazgeçilmezliğini ortaya koymaktadır. Gelecekte bu teknolojinin daha da gelişerek farklı üretim biçimlerini ortaya çıkarması beklenmektedir.

2.3. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği, mühendislik yapılarında çatlakların oluşumu ve ilerlemesini inceleyen bir disiplindir. Geleneksel üretim yöntemlerine göre farklılık gösteren katmanlı imalat (Additive Manufacturing - AM) yöntemleri, son yıllarda büyük bir gelişim göstermiştir. Fused Deposition Modelling (FDM), bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanıdır. Özellikle polilaktik asit (PLA) gibi termoplastik malzemelerle yapılan üretimlerde, yapıların mekanik özellikleri, katmanlar arası bağın kalitesine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir.

2.3.1. Kırılma mekaniği temelleri

Kırılma mekaniği temelde ikiye ayrılır: Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) ve elastoplastik kırılma mekaniği. LEFM çatlak ucunda elastik davranışın geçerli olduğu varsayımına dayanır.

Griffith (1920), gevrek malzemeler için enerji salınım hızına dayalı olarak çatlak ilerleme kriterini tanımlamıştır:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.1)$$

Burada G enerji salınım hızı, σ nominal gerilme, a çatlak yarı uzunluğu, E elastik modül.

Irwin (1957), Griffith teorisini gerilme yoğunluk faktörü (K) ile ilişkilendirmiştir:

$$G = \frac{K^2}{E} (\text{düzlem gerilme için}) \quad (2.2)$$

$K \geq K_{IC}$ olduğunda çatlak ilerler.

$$\text{Mode I için: } K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f_1(x) \quad (2.3)$$

a: çatlak boyu

$f_1(x)$ = boyut faktörü



3. YÖNTEM

3.1. Numunelerin Üretilmesi

3.1.1. Kullanılan PLA malzemenin özellikleri

Üç boyutlu yazıcılar kullanılarak yapılan üretim işlemlerinde PLA (Polilaktik Asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), TPU (Termoplastik Poliüretan), Nylon (Poliamid), PC (Polikarbonat) ve karbon elyaf takviyeli (ör. PLA+CF, Nylon+CF) filamentler gibi bir çok farklı malzeme kullanılabilir. Mevcut çalışmada PLA (polilaktik asit) filament kullanılmıştır. PLA filamentin kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. PLA Filamentin özellikleri

Başlık	Açıklama
Kimyasal Adı	Polilaktik Asit (Poli(laktid))
Kimyasal Formül	$-[C_3H_4O_2]_n-$
Monomer	Laktik Asit ($CH_3-CH(OH)-COOH$)
Yapısal Grubu	Alifatik Polyester
Fonksiyonel Gruplar	Ester grubu ($-COO-$)
Polimerleşme Tipi	Açık halka polimerizasyon
İzomer Tipleri	PLLA (L-laktid), PDLA (D-laktid), PDLLA (rastgele kopolimer)
Kaynağı	Yenilenebilir kaynaklar (mısır nişastası, şeker kamışı vb.)
Biyobozunabilirlik	Evet
Camsı Geçiş Sıcaklığı (T_g)	$\sim 55-65\text{ }^{\circ}C$
Erime Sıcaklığı (T_m)	$\sim 150-180\text{ }^{\circ}C$
Yoğunluk	$\sim 1.24\text{ g/cm}^3$
Yapı Özelliği	Yarı kristalin (PLLA); amorf (PDLLA)

3.1.2. Baskı işlemi

Mevcut çalışmada üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA malzeme ile üretilen numunelerin çekme, eğilme ve kırılma davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Numune üretimi sırasında Creality marka, Ender 3 V3 SE model üç boyutlu yazıcı

kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Creality Ender 3 V3 SE yazıcı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Creality ender 3 V3 SE yazıcı

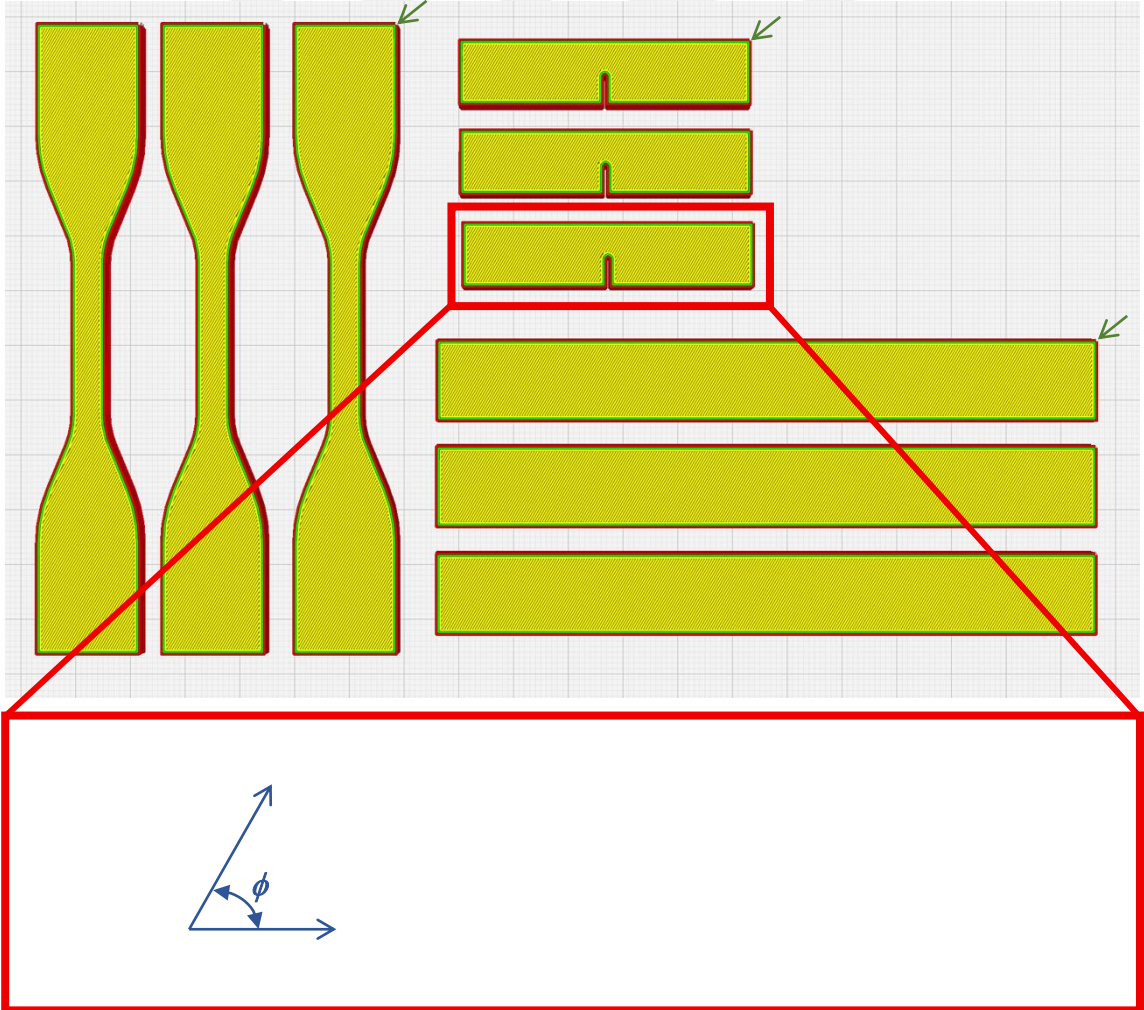
Yukarıda verilen standartlara göre Solidworks üç boyutlu modelleme programı kullanılarak çizilen numuneler Cura Ultimaker Cura 5.9.0 programı ile dilimlenmiştir. Dilimleme sırasında kullanılan ayarlar ve parametreler Tablo 3.2’de verilmiştir.

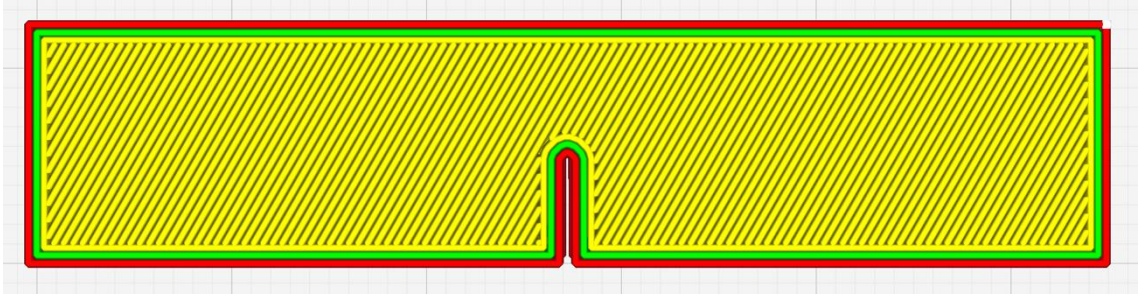
Tablo 3.2. 3 Boyutlu baskı özellikleri

Sıra no	Parametre	Değer
1	Tabaka yüksekliği (t_l)	0,16 mm
2	Nozul çapı	0,4 mm
3	Oryantasyon açısı (ϕ)	0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°
4	Dış hat sayısı (n_d)	1

5	Üst tabaka sayısı (n_u)	3
6	Alt tabaka sayısı (n_a)	3
7	Dolgu oranı (%v)	%100
8	Nozul sıcaklığı (T_n)	230 °C
9	Yazdırma tablası sıcaklığı (T_t)	60 °C
10	Yazdırma hızı (V_p)	180 mm/sn

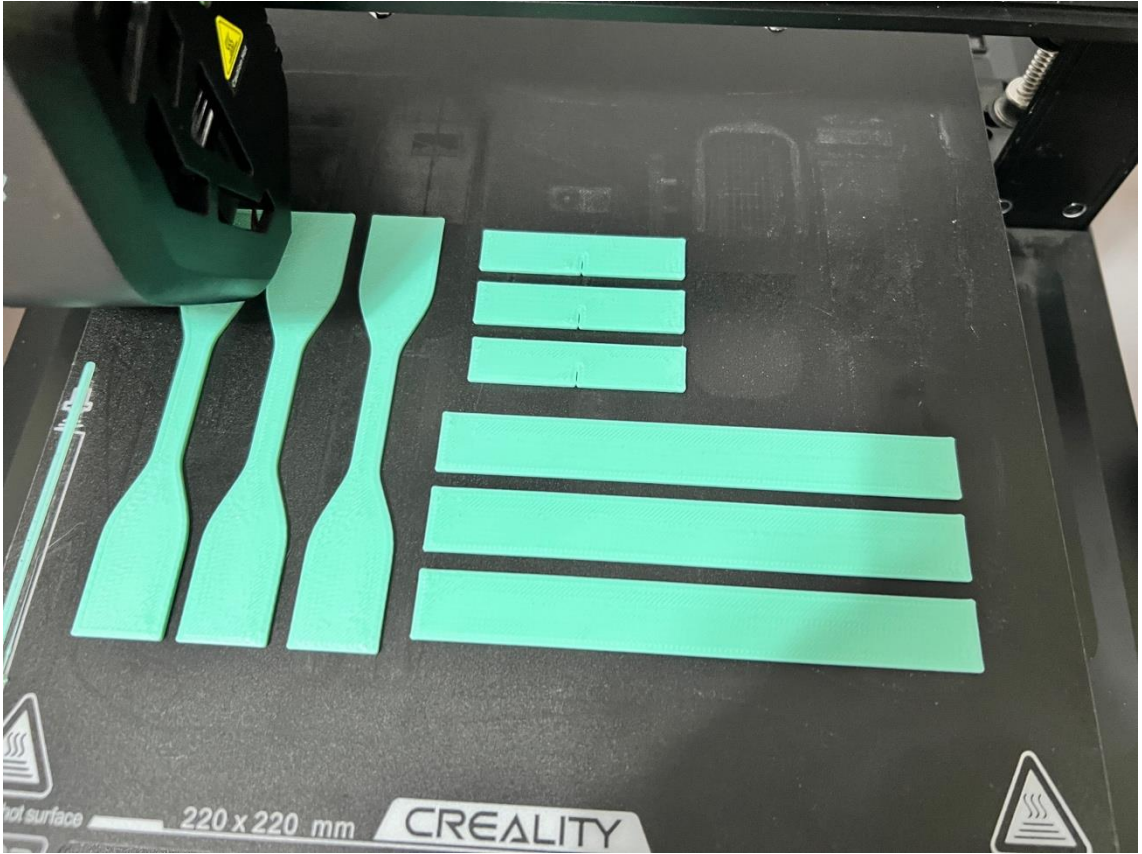
Yukarıda verilen parametrelere göre dilimlenen numuneler oda sıcaklığında (25 °C) ortamda yazdırılmıştır. Şekil 3.3’de numunelerin yerleşimi Cura programı ara yüzünde verilmiştir. Üretim sırasında yazdırma işleminin başladığı noktada yapışma sorunlarının olduğu geçmiş çalışmalarda ve mevcut çalışmanın ilk aşamalarında tespit edilmiştir. Bu nedenle testler sırasında yazdırmaya başlama noktasının etkisini ortadan kaldırmak amacıyla bütün yazdırma işlemleri numunelerin sağ üst köşesinden başlatılmıştır. Yazdırmaya başlama noktaları şekil 3.3’de yeşil oklar ile gösterilmiştir.





Şekil 3.2. Üretilen numunelerin ultimaker cura arayüzünde görünümü

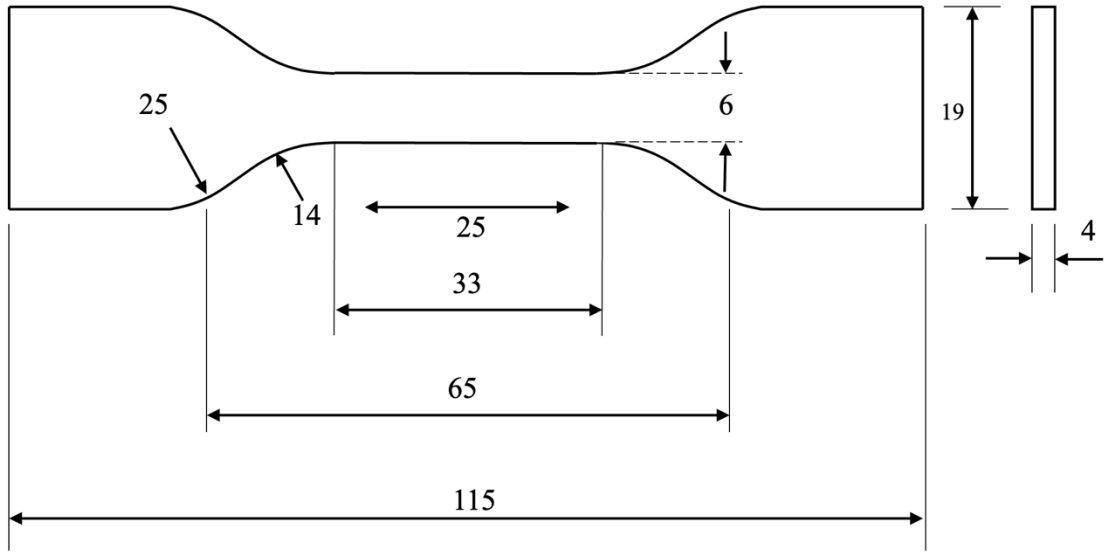
Üretilen test numunelerinin Creality Ender 3 V3 SE üç boyutlu yazıcı ile yazdırma işlemi sırasında görüntüsü Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Üretilen numunelerin creality ender 3 v3 se tablasındaki görüntüsü

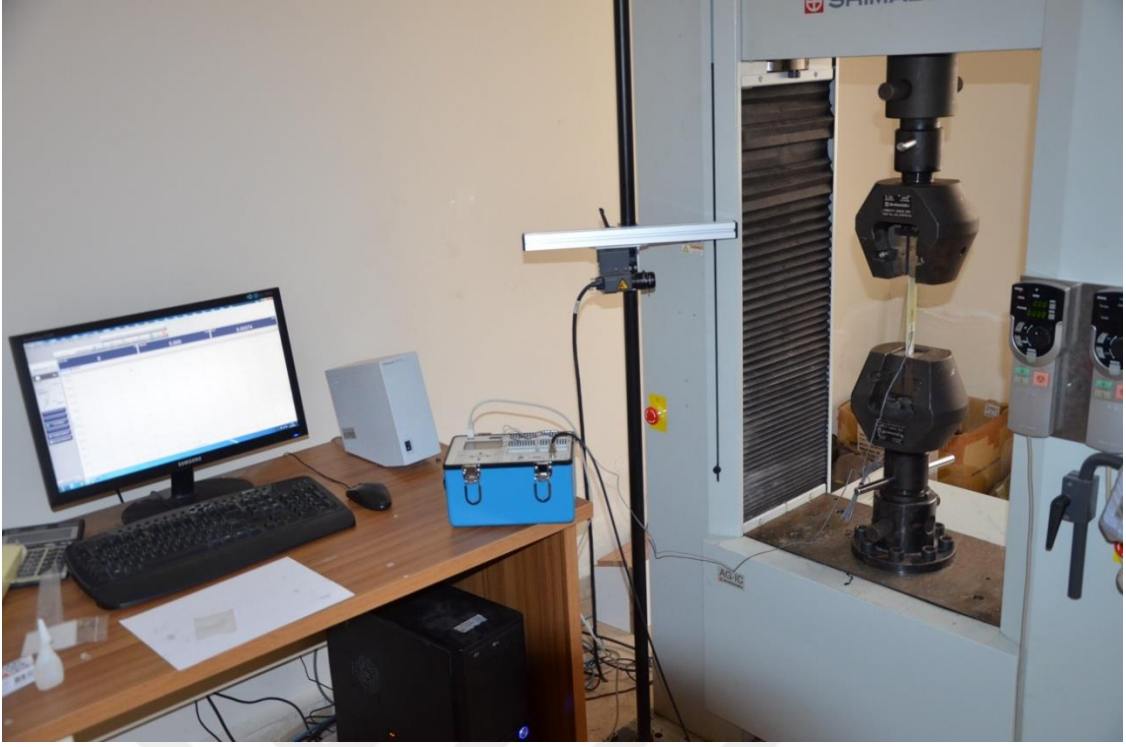
3.2. Çekme Testleri

Çekme test numuneleri ASTM D638 Tip 4 standardına göre üretilmiştir. Çekme test numunesinin boyutları Şekil 3.4.’de verilmiştir.test numunesi 4 mm kalınlığa sahip olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.4. Çekme test numunesi boyutları

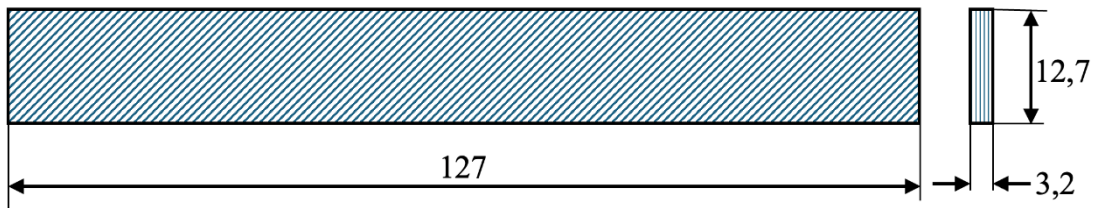
Çekme testleri Shimadzu universal test cihazı kullanılarak 5 kN kapasiteli yük hücresi ile yapılmıştır. Testler sırasında kullanılan Shimadzu universal test cihazı Şekil 3.5’de verilmiştir. Çekme testleri sırasında test hızı ilgili standartta belirtildiği gibi 5 mm/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.5. Shimadzu universal test cihazı

3.3. Eğilme Testleri

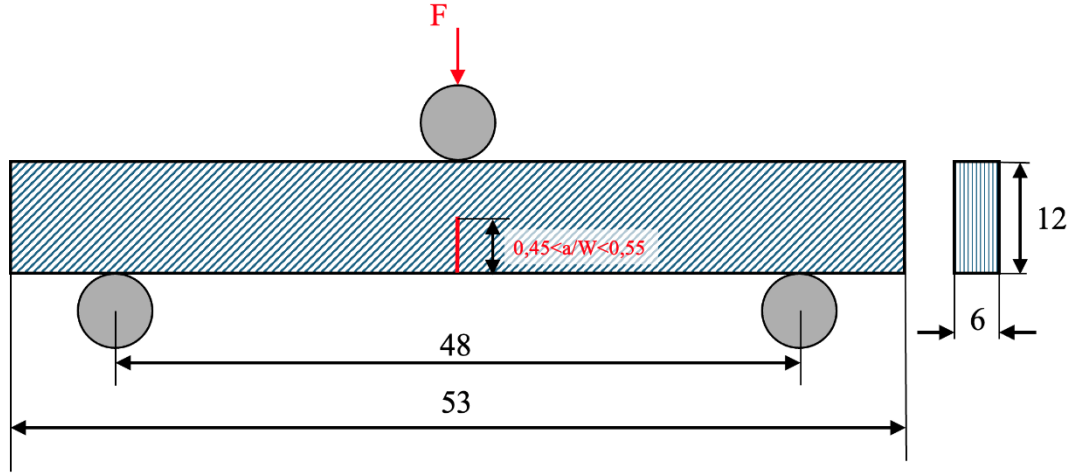
Eğilme test numuneleri ASTM E-790 standardına göre üretilmiştir. Eğilme test numunesinin boyutları Şekil 3.6.'da verilmiştir. Eğilme testleri Shimadzu universal test cihazı kullanılarak 5 kN kapasiteli yük hücresi ile yapılmıştır. Testler sırasında desteklerin çapı 10 mm seçilmiştir. Alt destekler arası mesafe kalınlığının 16 katı olan 51,2 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Eğilme test numunesi boyutları

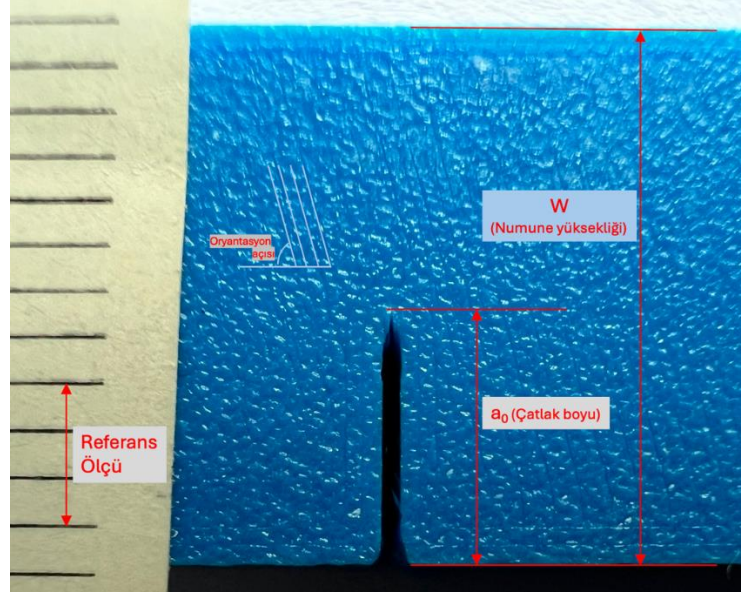
3.4. Kırılma Testleri

Kırılma test numuneleri ASTM D-5045 standardına göre üretilmiştir . Kırılma test numune boyutları ve test şeması Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kırılma test numunesi boyutları

Kırılma test numuneleri oluşturulurken çatlak boyu kritik öneme sahiptir ve ilgili standartta çatlak boyunun numune yüksekliğinin 0,45 katı ile 0,55 katı arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle üç boyutlu yazıcı ile imalat sırasında çatlak boyu numune yüksekliğinin 0,45 katı olan 5,4 mm olarak üretilmiş ve çatlak ucunun yeterince keskin olmasını sağlamak amacıyla her bir numune kullanılmamış bir jilet kullanılarak çatlak ilerletilmiştir. Kırılma testlerinden önce çatlak boyunun belirlenmesi amacıyla detaylı fotoğraflamalar yapılmıştır. Çekilen fotoğraflar kullanılarak imageJ programı vasıtasıyla çatlak boyu ve numune yüksekliği ölçülmüştür. Yapılan ölçüm neticesinde a/W oranının 0,45 ile 0,55 arasında olup olmadığı kontrol edilmiş ve bu şartı sağlamayan numunelerin testleri yapılmamıştır. Şekil 3.8’de örnek bir ölçüm verilmiştir.



Şekil 3.8. Kırılma test numunesi çatlak boyu ölçümü

Kırılma testleri neticesinde elde edilen hasar yükü değerleri kullanılarak gerilme yoğunluk faktörü (K_Q) belirlenmektedir. Gerilme yoğunluk faktörünün hesaplamasında kullanılan formül ASTM D-5045 standardında aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{BW^{\frac{1}{2}}} \right) f(x) \quad (3.1)$$

Formülde K_Q , Gerilme yoğunluk faktörü, P_Q , Hasar yükü, B , Numune genişliği, W , numune yüksekliğini tanımlamak için verilmiştir. $F(x)$ geometrik boyut faktörüdür ve aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1,99 - x(1-x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (3.2)$$

$$x = a/W \quad (3.3)$$

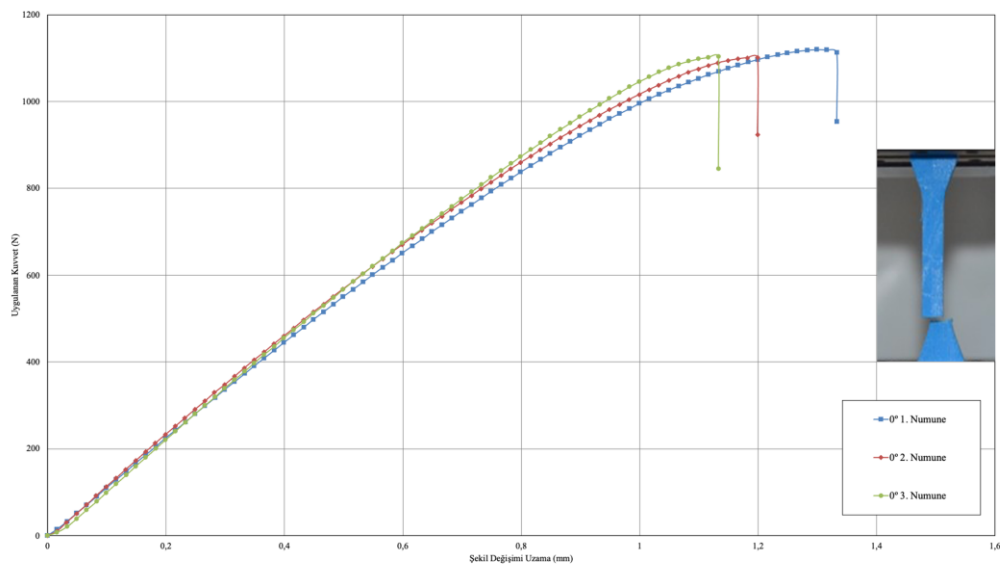
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında yenilikçi imalat yöntemlerinden olan üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak üretilen malzemelerin oryantasyon açısının malzemelerin mekanik özelliklerine ve kırılma davranışlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

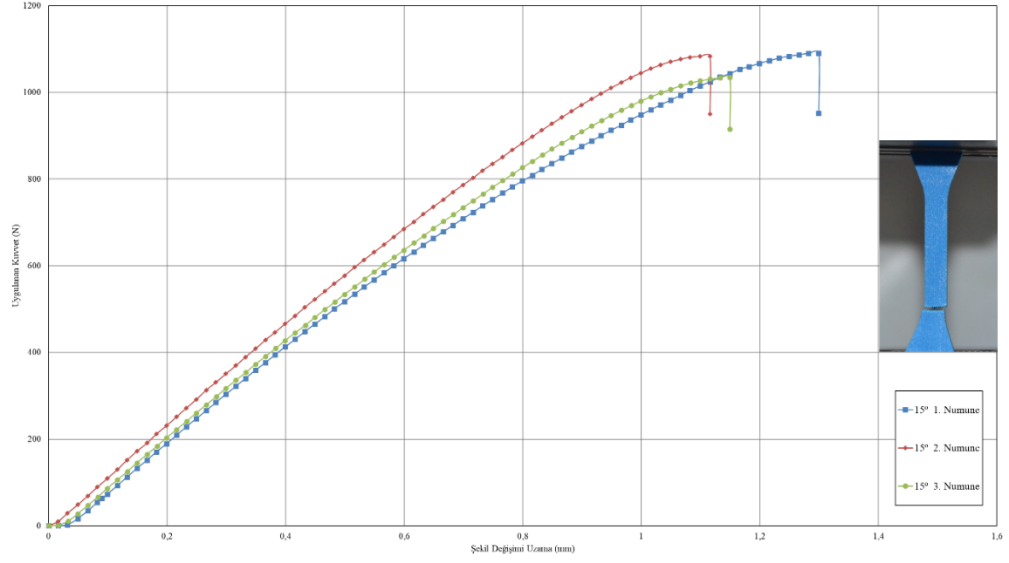
4.1. Çekme Test Sonuçları

Farklı oryantasyon açılarında üretilen numunelere uygulanan çekme testi neticesinde elde edilen Uygulanan Kuvvet – Şekil Değişimi grafikleri ve hasar uğramış numunelerin görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. Testler sonucunda ortaya çıkan eğrilerin bütün numuneler için benzer eğilimde olduğu, başlangıçta lineer bir artışın gözlemlendiği ardından eğimin giderek arttığı ve bütün numune modellerinde kırılmanın tek seferde meydana geldiği gözlenmiştir.

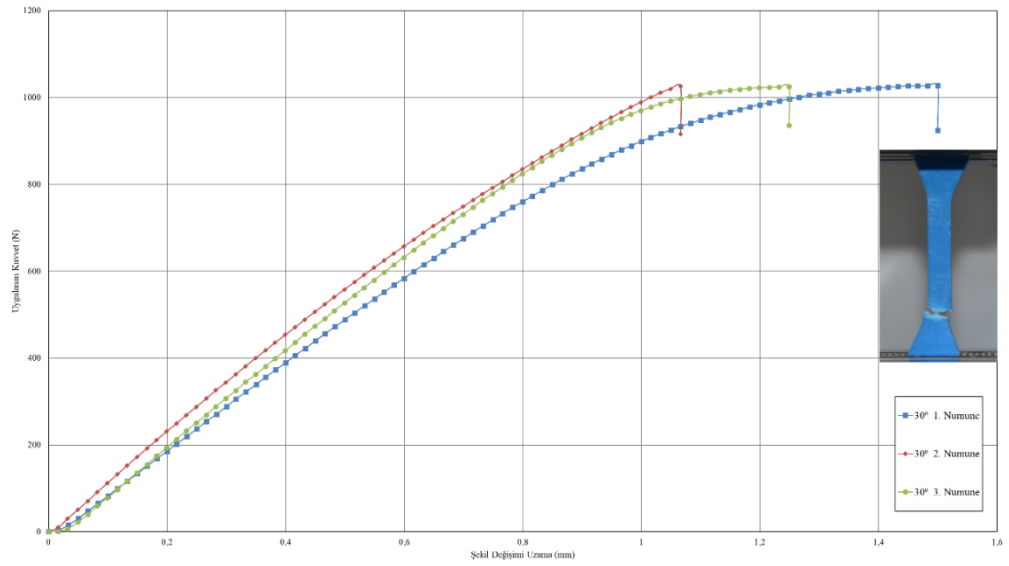
Çekme testi neticesinde hasar gören numuneler incelendiğinde düşük ve yüksek oryantasyon açılarında kırılma düzleminin yük doğrultusuna dik veya dike yakın olduğu görülmüştür. Numunelerin tamamında dolgu oranının %100 olarak seçilmesi nedeniyle oryantasyon açısının hasar yüzeylerinde belirgin olarak gözlenmediği, 30, 45 ve 60 derece oryantasyon açısı değerlerinde ise oryantasyon açısının hasar yüzeyinde de görülebilir olduğu gözlenmiştir.



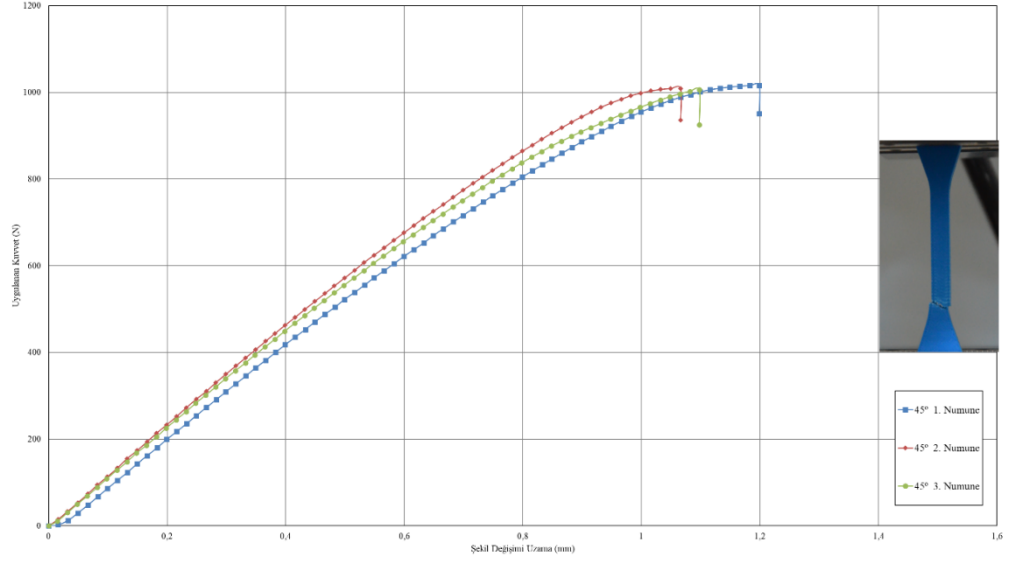
Şekil 4.1. 0 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



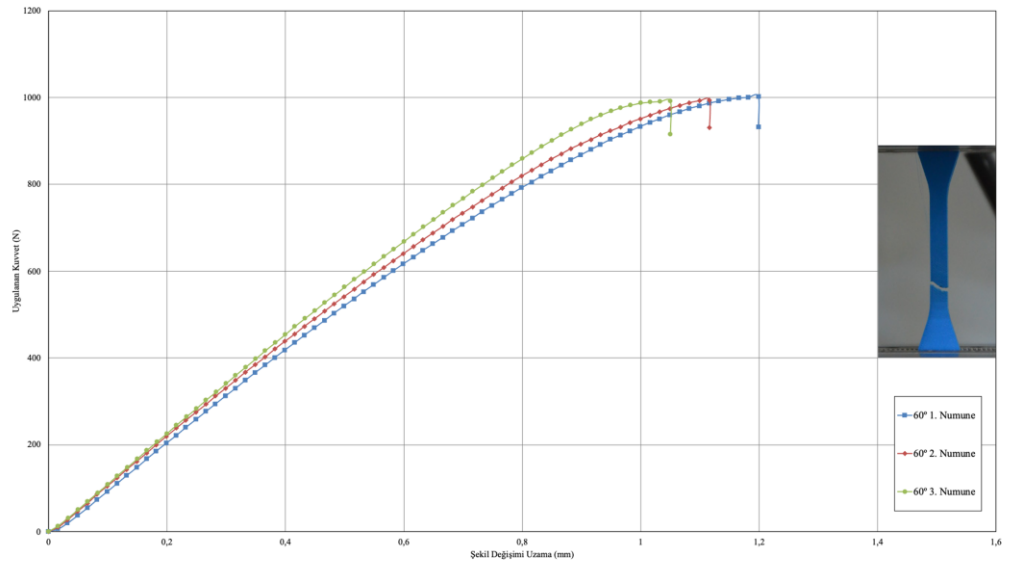
Şekil 4.2. 15 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



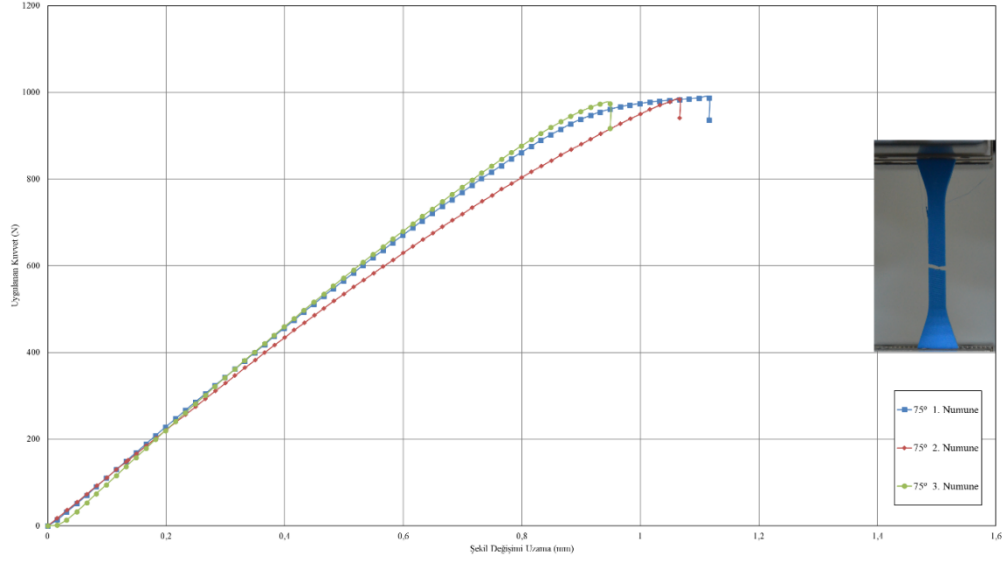
Şekil 4.3. 30 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



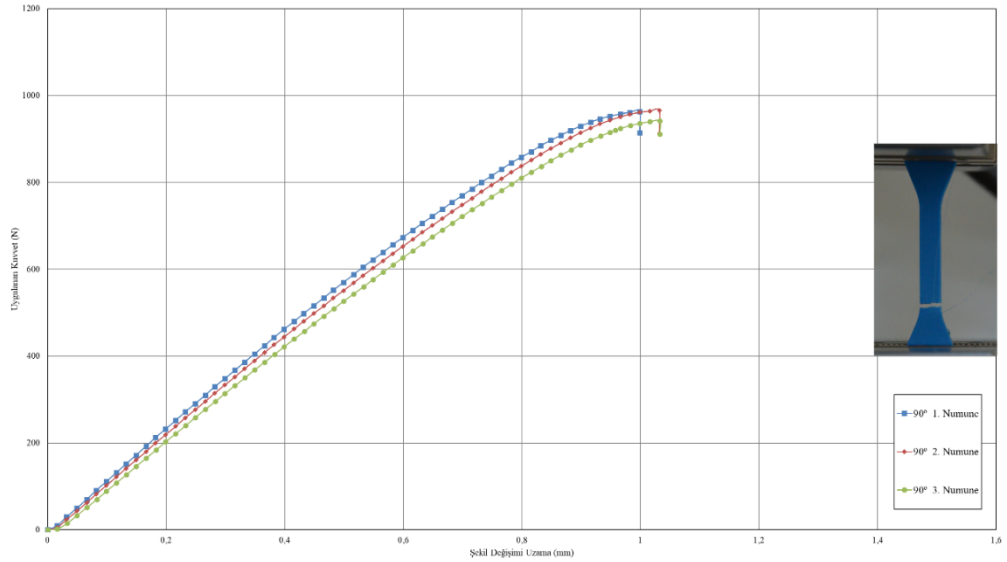
Şekil 4.4. 45 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



Şekil 4.5. 60 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



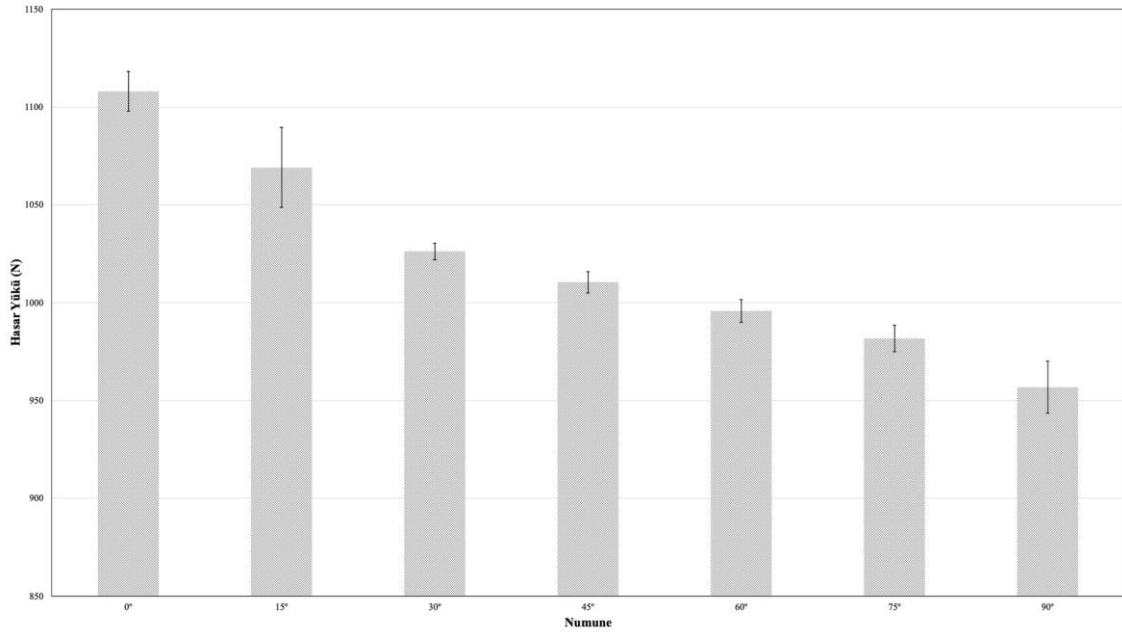
Şekil 4.6. 75 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü



Şekil 4.7. 90 derece oryantasyon açısına sahip numunelerin çekme test grafiği ve hasara uğramış numune görüntüsü

Çekme testleri neticesinde elde edilen ortalama hasar yükleri ve standart sapmalar Şekil 4.2’de verilmiştir. En yüksek hasar yükü 0° (yük uygulama yönü ile aynı doğrultuda) oryantasyon açısına sahip numunelerde 1.107,92 N olmuştur. Oryantasyon açısı arttıkça hasar yükü değerinde düşme gözlenmiştir. Bu düşüş oryantasyon açısının 15° ’den 30° ’ye çıkmasında maksimum değerini almış ve 15° oryantasyon açısında hasar yükü 1.069,17 N, 30° oryantasyon açısı değerinde hasar yükü %5 düşmüş ve 1.026,15 N değerini almıştır. 45° , 60° ve 75° oryantasyon açılarında hasar yükü değerleri sırasıyla

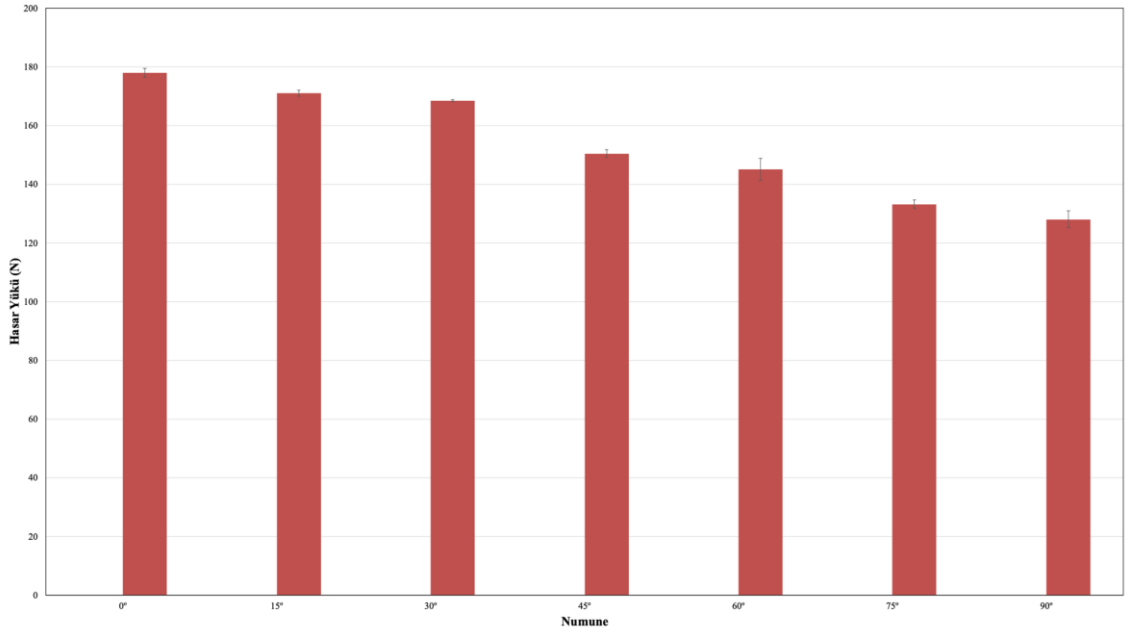
1.010,42 N, 995,65 N ve 981,72 N olmuştur. En düşük hasar yükünün görüldüğü 90° oryantasyon açısına sahip numunede hasar yükü 956,80 N olmuştur.



Şekil 4.8. Çekme testleri neticesinde elde edilen ortalama hasar yükleri ve standart sapmalar

4.2. Üç Nokta Eğilme Test Sonuçları

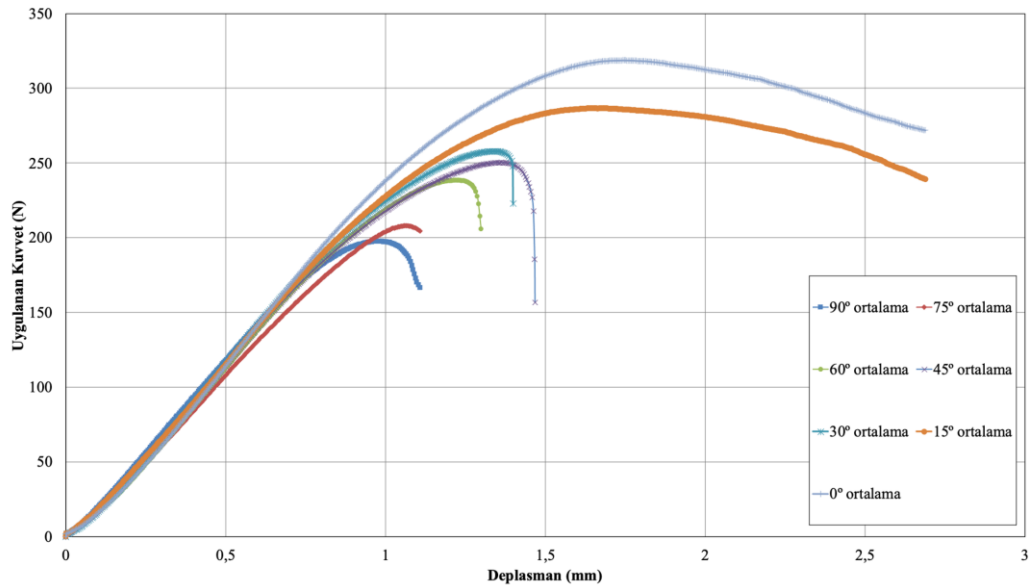
Üç nokta eğilme testleri neticesinde elde edilen ortalama hasar yükleri Şekil 4.3'te verilmiştir. En düşük hasar yükü 0° oryantasyon açısına sahip numunelerde 128,05 N olarak gözlenmiştir. En yüksek hasar yükü 177,96 N ile 90° oryantasyon açısına sahip numunelerde görülmüştür. Numune oryantasyon açısı arttıkça numune hasar yükünün çekme deneylerinin aksine arttığı ve 15°, 30°, 45°, 60°, 75° oryantasyon açıları için sırasıyla 133,20 N, 145,06 N, 150,47 N, 168,50 N ve 171,04 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Üç nokta eğilme testleri neticesinde hasar yükünün oryantasyon açısı ile değişimi

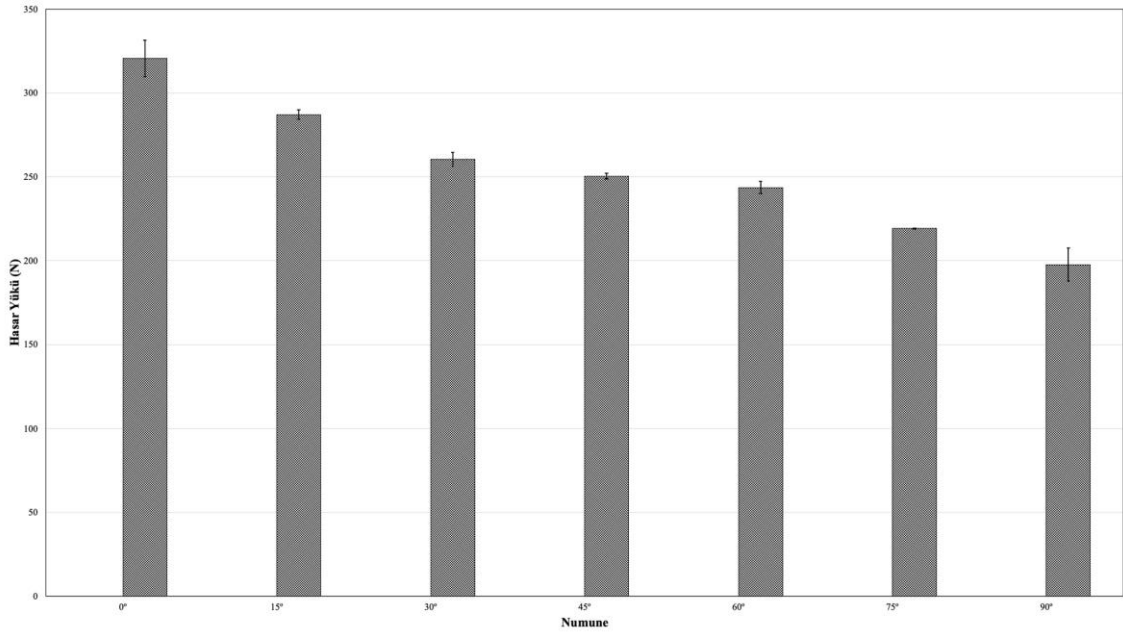
4.3. Tek Kenarı Çentikli Kiriş (Senb) Test Sonuçları

SENB testleri neticesinde elde edilen Uygulanan kuvvet – şekil değişimi eğrileri Şekil 4.4’te verilmiştir. Grafikten hasar yükünün artan oryantasyon açısı arttıkça arttığı görülmekte aynı zamanda artan oryantasyon açısı değeri numunelerde gözlemlenen şekil değişimini de arttırdığı görülmektedir.



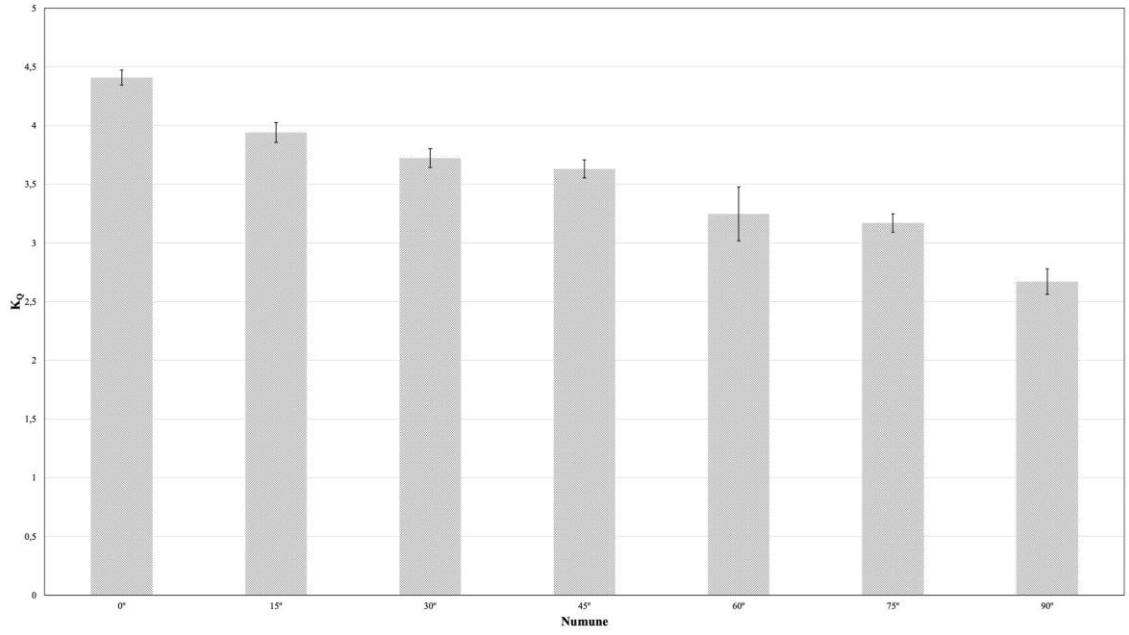
Şekil 4.10. SENB testleri neticesinde elde edilen uygulanan kuvvet – şekil değişimi grafiği

SENB testleri ile elde edilen hasar yükünün oryantasyon açısı ile değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Hasar yükü değeri oryantasyon açısı arttıkça artmıştır. Hasar yükü değerleri 30°,45°,ve 60° oryantasyon açısı değerlerinde oldukça yakın değerler almış ve sırasıyla 243,64 N, 250,48 N ve 260,47 N değerlerini almıştır. Minimum hasar yükü 0° oryantasyon açısına sahip numunede 197,70 N ve maksimum hasar yükü 90° oryantasyon açısına sahip numunede 320,60 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. SENB testleri neticesinde hasar yükünün oryantasyon açısı ile değişimi

Çatlak boyu ve maksimum hasar yükü değerleri kullanılarak hesaplanan gerilme yoğunluk faktörü (K_Q) değerinin oryantasyon açısı ile değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. En düşük K_Q değeri 0° oryantasyon açısına sahip numunede $2,67 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ değerini almıştır. K_Q değeri 15° oryantasyon açısına sahip numunede $3,17 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 30° oryantasyon açısına sahip numunede $3,25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ olmuştur. Oryantasyon açısı arttıkça K_Q değeri artmış ve 45°, 60° ve 75° oryantasyon açısına sahip numunelerde sırasıyla $3,63 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $3,72 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ve $3,94 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ değerlerini almıştır. 90° oryantasyon açısına sahip numunelerde bir önceki oryantasyon açısına sahip numuneye göre maksimum artış görülmüş ve K_Q değeri $4,41 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ olmuştur.



Şekil 4.12. Gerilme yoğunluk faktörü (K_I) değerinin oryantasyon açısı ile değişimi

SENB testi sonrası farklı oryantasyon açısı değerleri için numunelerin hasar durumları Şekil 4.7’de verilmiştir. Oryantasyon açısının kırılma davranışına etkisi eğilme ve çekme test numunelerinden daha fazla olduğu hasar fotoğraflarından görülmektedir. 15, 30, 45, 60 ve 75 derece oryantasyon açısına sahip numunelerde hasar oryantasyon açısı doğrultusunda ilerlemiştir. 0 ve 90 derece oryantasyon açısına sahip numunelerde ise hasar yük uygulama doğrultusunda ilerlemiştir. 60, 75 ve 90 derece oryantasyon açısına sahip numunelerde çatlak bölgesinin hemen üstünde eğilme hasarı görülmüş ve numune görüntülerinde bu durum numune renginde değişime neden olmuştur.



Şekil 4.13. SENB testleri sonrasında hasar görmüş numuneler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerinin ve kırılma davranışlarının deneysel olarak araştırıldığı bu sınırlı çalışma neticesinde oryantasyon açısının mekanik özelliklere etkisi üzerinde önemli etkileri gözlenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.1. Sonuçlar

- Çekme testleri sonucunda tüm oryantasyon açılarında benzer kuvvet–şekil değişimi eğrileri elde edilmiş; kırılmalar ani ve tek seferde gerçekleşmiştir. Hasar incelemelerinde, düşük ve yüksek açılarda kırılma düzlemi yük yönüne dik olurken, orta açılarda (30°, 45°, 60°) oryantasyon izlerinin hasar yüzeyinde belirgin şekilde görüldüğü tespit edilmiştir.
- Çekme testleri sonucunda en yüksek hasar yükü 0° oryantasyon açısında 1.107,92 N olarak ölçülmüş, oryantasyon açısı arttıkça hasar yükünde kademeli bir azalma gözlenmiştir. En düşük hasar yükü ise 90° oryantasyon açısında 956,80 N olarak tespit edilmiştir.
- Üç nokta eğilme testleri sonucunda, oryantasyon açısı arttıkça hasar yükünün arttığı gözlenmiş; en düşük değer 0° açısında 128,05 N, en yüksek değer ise 90° açısında 177,96 N olarak ölçülmüştür. Bu durum, eğilme testlerinde hasar yükünün çekme testlerinin aksine oryantasyon açısıyla birlikte arttığını göstermektedir.
- SENB testleri, oryantasyon açısı arttıkça hem hasar yükünün hem de numunelerde gözlemlenen şekil değişiminin arttığını göstermektedir. Bu durum, artan oryantasyon açısının kırılma davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
- En düşük KQ değeri 0° oryantasyonunda 2,67 MPa·m^{1/2} iken, en yüksek değer 90° oryantasyonunda 4,41 MPa·m^{1/2} olarak elde edilmiş ve en büyük artış bu açıda gözlenmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle %100 dolgu oranında üretilen PLA malzemeye ait numunelerin farklı oryantasyon açıları altında mekanik ve kırılma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, oryantasyon açısının numune performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Farklı Malzeme Türlerinin Karşılaştırılması: Bu tez kapsamında yalnızca PLA malzemesi kullanılmıştır. Farklı termoplastik polimerler (örneğin ABS, PETG, PA6 gibi) ile benzer deneylerin gerçekleştirilmesi, malzeme türünün oryantasyon kaynaklı mekanik davranış üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini sağlayacaktır.
- Dolgu Oranı ve Deseninin Etkileri: Çalışmada sabit tutulan %100 dolgu oranı yerine, farklı dolgu oranları (%20, %50, %80 vb.) ve dolgu desenleri (dikdörtgen, bal peteği, çapraz vb.) kullanılarak yapılan üretimlerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Sayısal ve Analitik Modellemenin Kullanılması: Elde edilen deneysel verilerin doğrulanması ve daha geniş kapsamlı analizlerin yapılabilmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal modellemeler geliştirilebilir. Böylece farklı oryantasyon açılarının gerilme dağılımı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenebilir.
- Hibrit veya Birleştirilmiş Yapıların İncelenmesi: Farklı oryantasyonlarda üretilmiş parçaların yapıştırılmasıyla elde edilen yapılar ya da FDM ile geleneksel yöntemlerin birleştirildiği hibrit yapıların mekanik özellikleri ve kırılma karakteristikleri analiz edilerek, uygulama odaklı çözümler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S. (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. *Polymer Testing*, 60, 94-101.
- Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P., & Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 308-317.
- Ayatollahi, M. R., Nabavi-Kivi, A., Bahrami, B., Yahya, M. Y., & Khosravani, M. R. (2020). The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 237, 107225.
- Badiru, A. B., Valencia, V. V., Liu, D., & Hartsfield, C. R. (Eds.). (2017). *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry*. CRC Press.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, 55(2), 155-162.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and physical prototyping*, 11(3), 209-225.
- Camargo, J. C., Machado, Á. R., Almeida, E. C., & Silva, E. F. M. S. (2019). Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2423-2443.
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2016). *3D printing and additive manufacturing: principles and applications-of rapid prototyping*. World Scientific Publishing Company.
- Crespi, N., Drobot, A. T., & Minerva, R. (2023). The Digital Twin: What and Why?. In *The Digital Twin* (pp. 3-20). Cham: Springer International Publishing.
- Do, A. V., Khorsand, B., Geary, S. M., & Salem, A. K. (2015). 3D printing of scaffolds for tissue regeneration applications. *Advanced healthcare materials*, 4(12), 1742-1762.
- Dudek, P. F. D. M. (2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of metallurgy and materials*, (4).
- European Commission. (2020). *Circular economy action plan*.

- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-aided design*, 69, 65-89.
- Ge, Z., Song, Z., Ding, S. X., & Huang, B. (2017). Data mining and analytics in the process industry: The role of machine learning. *Ieee Access*, 5, 20590-20616.
- Gebler, M., Uiterkamp, A. J. S., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy policy*, 74, 158-167.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Direct digital manufacturing. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 375-397.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
- Girgin, C. D., & Yilmaz, S. (2022). Endüstri 4.0 Kavramsal Çerçeve. *Turkish Management Review*, 1(1), 27-45.
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54.
- Grigoriev, S., Okunkova, A., Sova, A., Bertrand, P., & Smurov, I. (2015). Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications. *Surface and coatings Technology*, 268, 77-84.
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*, 8, 215-243.
- Hart, K. R., & Wetzel, E. D. (2017). Fracture behavior of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 177, 1-13.
- Hill, N., & Haghi, M. (2014). Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 221-227.
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2019). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191-1203.
- Hull, C. W. (1984). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *United States Patent, Appl., No. 638905, Filed*.

- Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP annals*, 56(2), 730-759.
- Lanzillotti, P., Gardan, J., Makke, A., & Recho, N. (2019). Enhancement of fracture toughness under mixed mode loading of ABS specimens produced by 3D printing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(4), 679-689.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- Lipton, J. I., Cutler, M., Nigl, F., Cohen, D., & Lipson, H. (2015). Additive manufacturing for the food industry. *Trends in food science & technology*, 43(1), 114-123.
- Melchels, F. P., Domingos, M. A., Klein, T. J., Malda, J., Bartolo, P. J., & Hutmacher, D. W. (2012). Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in polymer science*, 37(8), 1079-1104.
- Möhring, H. C., Wiederkehr, P., Erkorkmaz, K., & Kakinuma, Y. (2020). Self-optimizing machining systems. *CIRP Annals*, 69(2), 740-763.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B. I., ... & Bracke, J. (2010). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1917), 1999-2032.
- NASA. (2020). 3D printing in space exploration. <https://www.nasa.gov>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Pakkanen, J., Manfredi, D., Minetola, P., & Iuliano, L. (2017). About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: State of the art and research opportunities. *Sustainable Design and Manufacturing 2017: Selected papers on Sustainable Design and Manufacturing 4*, 776-785.
- Panda, B., Lim, J. H., & Tan, M. J. (2019). Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering*, 165, 563-571.
- Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36-53.
- Pisková, L., Dobranschi, M., Semerád, P., & Otavová, M. (2023). *The Impact of Robot Installations on Employment and Labour Productivity in the Automotive Industry*. *Central European Business Review*.
- Primo, T., Calabrese, M., Del Prete, A., & Anglani, A. (2017). Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product

- design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 467-479.
- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological forecasting and social change*, 102, 214-224.
- Schwab, K., Samans, R., Zahidi, S., Leopold, T. A., Ratcheva, V., Hausmann, R., & Tyson, L. D. (2017, November). The global gender gap report 2017. World Economic Forum.
- Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y., & Hong, G. S. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and bioprocess technology*, 8, 1605-1615.
- Talagani, M. R., DorMohammadi, S., Dutton, R., Godines, C., Baid, H., Abdi, F., ... & Blue, C. (2015). Numerical simulation of big area additive manufacturing (3D printing) of a full size car. *SAMPE J*, 51(4), 27-36.
- Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of manufacturing systems*, 48, 157-169.
- Turhan, E., Kartum, G., & Özdemir, Y. (2018). Sürdürülebilir üretim ve işletme uygulamaları. *Bucak İşletme Fakültesi Dergisi*, 1(1), 1-15.
- Turner, B. N., & Gold, S. A. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), 250-261.
- Ventola, C. L. (2014). Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704.
- Wang, B. Z., & Chen, Y. (2014). The effect of 3D printing technology on the future fashion design and manufacturing. *Applied Mechanics and Materials*, 496, 2687-2691.
- Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, K., & Dai, S. (2020). Implementation of an elastoplastic constitutive model for 3D-printed materials fabricated by stereolithography. *Additive Manufacturing*, 33, 101104.
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 106, 103-116.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a

comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846.

Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., & Li, S. (2019). A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*, 163, 393-402.

Zhou, L. Y., Fu, J., & He, Y. (2020). A review of 3D printing technologies for soft polymer materials. *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2000187.

