

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PLA VE ABS POLİMERLERİN HIZLI PROTOTİPLEME ÜRETİMİ SONRASI
MEKANİK DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAHMİ ÇELİKELOĞLU

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2023

10515079

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PLA VE ABS POLİMERLERİN HIZLI PROTOTİPLEME ÜRETİMİ SONRASI
MEKANİK DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAHMİ ÇELİKELOĞLU

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2023

10515079

BEYAN

“PLA ve ABS Polimerlerinin Hızlı Prototipleme Üretimi Sonrası Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Rahmi ÇELİKELOĞLU

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Tez çalışmamda yardımlarını, anlayışlarını ve emeklerini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Emre Esener' e, beni bu günlere getiren üzerimdeki haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem Nadire Çelikeloglu, babam Oktay Çelikeloglu ve biricik kardeşim Elifnur Çelikeloglu' na ayrıca hayatımın her aşamasında yanımda olan desteğini, sevgisini ve emeğini daima hissettiren eşim Gamze Çelikeloglu' na ve yüzündeki gülümsemesiyle hayatı kolaylaştıran değerli kızım Defne Çelikeloglu' na teşekkür ederim.

Rahmi ÇELİKELOĞLU

2023



ÖZET

PLA VE ABS POLİMERLERİN HIZLI PROTOTİPLEME ÜRETİMİ SONRASI MEKANİK DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, hızlı prototipleme teknolojisinde kullanılan yöntemlerden birisi olan eriyik biriktirme yöntemi ile üretilen numunelerin üretim parametrelerindeki değişikliklerin malzemenin mekanik davranışları üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, ABS ve PLA termoplastik malzemeleri kullanılarak üretilen numunelere malzemelerin mekanik özelliklerinin tespitinde sıkça kullanılan çekme, basma ve üç nokta eğme testleri uygulanarak proses parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Proses parametrelerinden dolgu geometrisi ve dolgu oranları aynı iken dolgu geometrisinin doku açıları 0, 15, 30 ve 45 derece olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, PLA malzeme ABS malzemeye göre daha yüksek kuvvet davranışı sergilemiştir. Doku açılarındaki değişiklik yönünden ise 45° lik doku açısı ile üretilen numuneler iki malzeme türü içinde kritik değer olarak öne çıkmış ve kuvvet değerinde azalma gösterirken uzama değerlerinde ise bariz bir artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Polimer, Hızlı Prototipleme, Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi, Basma Testi

ABSTRACT

EVALUATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PLA AND ABS POLYMERS AFTER RAPID PROTOTYPING PRODUCTION

In this study, it is aimed to investigate the effect of the changes in the production parameters of the samples produced by the melt deposition method, which is one of the methods used in rapid prototyping technology, on the mechanical behavior of the material. In this context, the effects of process parameters were investigated by applying tensile, compression and three-point bending tests, which are frequently used in determining the mechanical properties of the materials, to the samples produced using ABS and PLA thermoplastic materials. While the filling geometry and filling ratios of the process parameters were the same, the texture angles of the filling geometry were changed to 0, 15, 30 and 45 degrees. According to the results obtained, PLA material exhibited higher force behavior compared to ABS material. In terms of the change in texture angles, the samples produced with a texture angle of 45° stood out as the critical value in both material types and showed a decrease in the strength value while causing a significant increase in the elongation values.

Keywords: Polymer, Rapid Prototyping, Tensile Test, Three-Point Bending Test, Compression Test

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Polimer.....	1
1.2. Hızlı Prototipleme Teknolojisi.....	1
1.3. Hızlı Prototipleme Teknolojisi Çeşitleri	4
1.3.1. Tarayarak Işıklı Kurlama (Stereolithography Apparatus, SLA).....	5
1.3.2. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS)	6
1.3.3. Eriyik Biriktirme Modelleme Tekniği (Fused Deposition Modelling, FDM)....	7
2. MEKANİK TESTLER	10
2.1. Çekme Deneyi	12
2.2. Basma Deneyi.....	14
2.3. Üç Nokta Eğme Deneyi.....	15
3. HIZLI PROTOTİPLEME TEKNOLOJİSİ PROSES PARAMETRELERİ.....	17
3.1. Eklemeli İmalat Yöntemi Proses Parametreleri	17
3.2. Literatür Araştırması.....	24
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI	28
4.1. Numune Üretimi	28
4.2. Mekanik Deneylerin Gerçekleştirilmesi	34
4.2.1. Çekme Deneyi.....	34
4.2.2. Basma Deneyi	37
5. TARTIŞMA	45
KAYNAKÇA	47

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. PLA ve ABS malzemeden üretilen filamentlerin proses parametreleri	18
Tablo 3.2. Dolgu geometri çeşitlerinin aynı dolgu doluluk oranındaki görüntüleri.....	21
Tablo 4.1. PLA ve ABS malzemeden üretilen test numunelerinin üretim parametreleri.....	32



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Hızlı prototipleme teknolojisi üretim adımları	2
Şekil 1.2. 2021 yılında en çok tercih edilen üç boyutlu yazıcı teknolojileri.....	4
Şekil 1.3. SLA çalışma prensibi.....	5
Şekil 1.4. SLS sisteminin çalışma prensibi	6
Şekil 1.5. FDM tekniğinin çalışma prensibi	8
Şekil 2.1. Çekme testi uygulama sistemi çalışma prensibi	12
Şekil 2.2. Gerilme-gerinim eğrisi.....	13
Şekil 2.3. Basma kuvveti uygulanan malzemelerdeki fiçi oluşumu a) fiçi oluşumunun ilk aşaması b) fiçi oluşumunun tamamlanması	14
Şekil 2.4. Üç nokta eğme numunesine uygulanan kuvvet ve numunede oluşan sehim.....	15
Şekil 3.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinde 2015-2019 yılları arasında en çok tercih edilen malzemeler	17
Şekil 3.2. Eriyik biriktirme yöntemiyle üretimde oluşturulan bir katman	18
Şekil 3.3. a) Alt katman ve duvarlardan oluşan kabuk görünümü b) Dolgu c) Alt katman, duvarlar ve dolgu görünümü	20
Şekil 3.4. Sırasıyla %20 – %45 – %80 dolgu doluluk oranları.....	22
Şekil 3.5. Dolgu bölümü a-0, b-45 derecelik açılar ile tasarlanan modelin görüntüsü	23
Şekil 4.1. Sırasıyla çekme, basma ve üç nokta eğme test numuneleri teknik resimleri.....	29
Şekil 4.2. Sırasıyla PLA ve ABS malzemeden üretilen filamentler	30
Şekil 4.3. Sırasıyla 0°, 15°, 30° ve 45° lik doku açılarının gösterimi.....	31
Şekil 4.4. Sırasıyla çekme testi numunesi ve üç nokta eğme testi numunesinin üretim tablasındaki konumu	33
Şekil 4.5. Basma testi numunesinin üretim tablasındaki konumu	34
Şekil 4.6. Sırasıyla PLA ve ABS malzemeden üretilen çekme test numuneleri.....	34
Şekil 4.7. Sırasıyla cihaz, PLA ve ABS malzemeden çekme deney numunelerinin tek eksenli çekme test sistemi.....	35
Şekil 4.8. Sırasıyla ABS ve PLA test numunelerin çekme deneyi sonrası örnek numune görseli	35
Şekil 4.9. PLA malzemeden üretilen çekme deney numunesinin test sonrası kesit görüntüsü	36
Şekil 4.10. PLA malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri	36

Şekil 4.11. ABS malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri	37
Şekil 4.12. Sırasıyla PLA ve ABS malzemeden üretilen basma test numuneleri	38
Şekil 4.13. Sırasıyla cihaz, ABS ve PLA malzemeden basma deneyi numunelerinin test sistemi	38
Şekil 4.14. Sırasıyla PLA ve ABS test numunelerin basma deneyi sonrası örnek numune görseli	39
Şekil 4.15. ABS ve PLA malzemelerinden üretilen numunelere gerçekleştirilen basma testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi.....	40
Şekil 4.17. Sırasıyla cihaz, ABS ve PLA malzemeden üç nokta eğme deneyi numunelerinin test sistemi.....	42
Şekil 4.18. Sırasıyla PLA ve ABS test numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası örnek numune görseli	42
Şekil 4.19. ABS malzemeden üretilen üç nokta eğme numunesinin test sonrası kırılan kesit görüntüsü	43
Şekil 4.20. PLA malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.....	43
Şekil 4.21. ABS malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri.....	44

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

mm	: Milimetre
CO₂	: Karbondioksit
UV	: Ultraviyole ışınları
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
3D	: Üç boyutlu
SLA	: Stereo Lithography Apparatus (Tarayarak Işıkla Kürleme)
FDM	: Fused Deposition Modelling (Eriyik Biriktirme Modelleme)
LOM	: Laminated Object Manufacturing (Tabaka Yapıştırırmalı İmalat)
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
PLA	: Poliaktirik Asit
PETG	: Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified
TPU	: Termoplastik Poliüretan
DMLS	: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
G	: Kayma modülü
τ_A	: Kayma akma gerilmesi

1. GİRİŞ

1.1. Polimer

“Poli” latince de çok sayıda anlamına gelmektedir. Monomer adı verilen basit moleküllerin kimyasal bağlarla bağlanması sonucunda yüksek molekül ağırlığına sahip polimerler meydana gelmektedir. Doğal olarak bulunan ve sentetik olarak üretilen polimerler geniş özellik yelpazesinden dolayı yaşamımızda birçok alanda rol almaktadır. PVC, teflon, naylon gibi malzemeler günlük hayatımızda ve endüstride yaygın kullanılan polimerlerdir. Bunların yanı sıra plastik ve kauçuk malzemelerin tümü polimer esastır (Erdem ve Morgil, 2002: 89).

Belirli sıcaklıklarda eritilip şekil verildikten sonra soğutulduğunda aldığı şekli muhafaza ettiğinden polimerlerin kullanım alanları gelişen teknoloji ile çok çeşitlenmektedir. Polimer malzemelerin günümüz üretim yöntemleri ile yollarının kesiştiği bir alanda hızlı prototipleme teknolojisidir. Halen gelişmekte olan bu teknolojiye kullanılan yaygın üretim yöntemlerinde toz, tabaka veya dairesel kesitli polimer esaslı malzemeler olan termoplastikler yaygın olarak kullanılmaktadır.

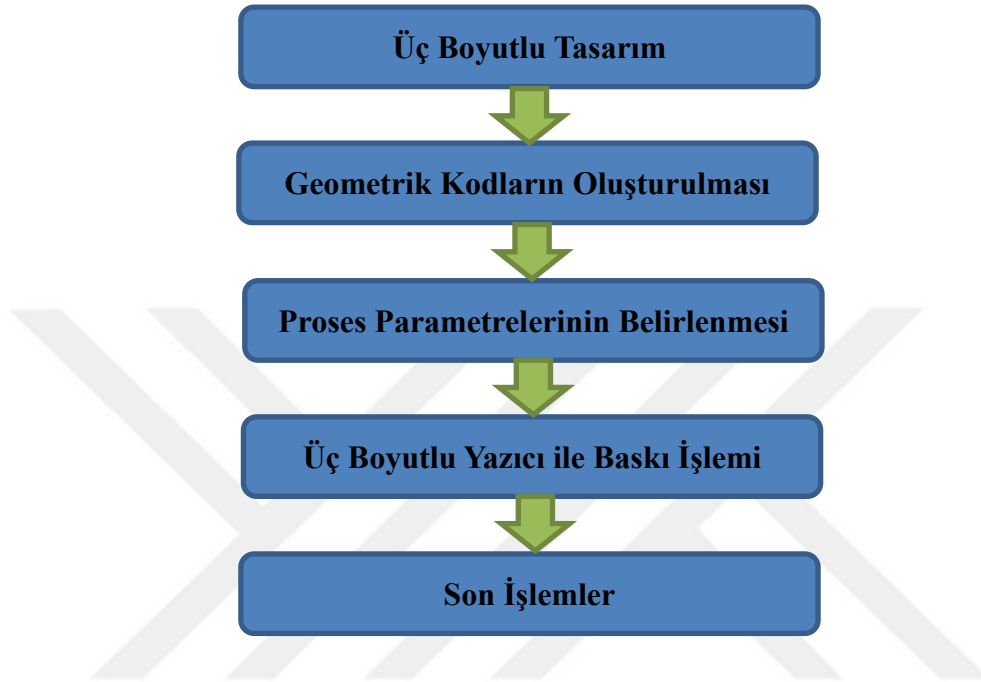
Bu çalışmadaki deneylere de konu olacak olan termoplastik malzemeler, ısıya maruz kaldıklarında yumuşayarak şekil verilmesi kolaylaşan bükülebilir veya kalıplanabilir hale gelen daha sonra soğutulduğunda katılaşan polimer esaslı malzemelerdir. Bu polimer esaslı termoplastik malzemeler hızlı prototipleme teknolojisinin birçok yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2. Hızlı Prototipleme Teknolojisi

Geleneksel imalat yöntemlerinde dolu malzemeden talaş alınarak veya kütsel şekil verme teknikleri ile ürün üretilmektedir. Bu üretim yöntemleri öncesinde kalıp veya prototip üretimleri gerçekleştirilmektedir. Kalıp veya prototip üretimi ürün tasarım ve üretim sürecine ilave olarak maliyet, tasarım süreci ve malzeme ihtiyacı doğurmaktadır. Gelişen teknoloji ile beraberinde getirdiği rekabetçi piyasa koşulları bu ilave harcamaları en aza indirilmesini gerektirmiştir. İşte bu aşamada yeni imalat yöntemleri arayışına girilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda doğan yöntemlerden birisi olan hızlı prototipleme teknolojisi ürün tasarım ve üretim sürecinin daha verimli ve rekabetçi olmasına olanak sağlamıştır. (Özdoğan, 2021: 1)

Üst üste katmanların eklenmesi yöntemiyle model, kalıp veya nihai ürünün üretiminin yapılabilmesine olanak sağlayan hızlı prototipleme teknolojisi, eklemeli imalat yöntemi olarak da adlandırılmaktadır.

80’li yıllardan günümüze kadar endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılarak gelişen ve yaygınlaşan hızlı prototipleme teknolojisinin günümüzde birçok yöntemi mevcuttur. Hızlı prototipleme teknolojisinde üretim için farklı yöntemleri içeren sistemler kullanılsa da üretim için izlenecek yol temelde Şekil 1.1.’de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 1.1. Hızlı prototipleme teknolojisi üretim adımları

İlk adımda bilgisayar destekli üç boyutlu tasarım programları veya üç boyutlu tarayıcı sistemler kullanılarak tasarım oluşturulmaktadır. Sonrasında tasarlanan modele dair geometrik kodlar STL, 3MF, OBJ, X3D gibi gerekli formatlarda yapılandırılmaktadır. Yaratılan kodlar dilimleme programlarına atılarak üretim aşamasındaki katman yüksekliği, baskı sıcaklığı, malzeme bilgileri, dolgu tipi ve yoğunluğu, baskı hızı gibi proses parametreleri belirlenmektedir. Parametreleri belirlenen modele dair veri üç boyutlu yazıcıya aktarılır ve kalibrasyon ayarı yapıldıktan sonra baskı işlemine başlanabilmektedir. Üretim tamamlandıktan sonra kullanılacak alana göre destek yapılarının sökülmesi, zımpara, boyama, polisaj veya dolgu yapma gibi son işlemler uygulanmaktadır.

Hızlı prototipleme teknolojisinde üretim için temelde bu adımlar izlense de kullanım alanına, kullandığı malzemeye, çalışma prensiplerine göre kullanılan yöntemler ve sistemler değişkenlik göstermektedir.

Bu yöntemleri çalışma şekillerine göre toz halindeki bir malzemeyi sinterleme ya da eritip birleştirme, filament halindeki bir malzemeyi eriterek katman oluşturma, akışkan bir malzemeyi kütleme veya yaprak halindeki bir malzemedan katman ve laminasyon oluşturma şeklinde kategorize etmek mümkündür (Özbey, 2020: 12).

Ayrıca üst üste eklenecek katmanları oluşturacak malzemeleri birleştirme yöntemleri olarak lazer ışını, UV ışık kaynağı, elektrik ark yöntemi ya da ısı enerjisi kullanarak ergitme yöntemi ile üretim yapan sistemler olarak da kategorize edilebilir. Bu bilgiler ışığında hızlı prototipleme teknolojisinin mantığı; sıvı, toz veya katı haldeki malzemelere, lazer ve diğer yöntemlerle foton veya doğrudan ısı uygulayarak bilgisayar yazılımları aracılığıyla herhangi bir kalıp veya aparat olmadan şekillendirilmesi olarak tarif edilebilir (Özbey, 2020: 13).

Genel olarak bu şekilde kategorize edilebilen hızlı prototipleme teknolojisinin üretim yöntemleri kullanım alanının genişlemesine paralel olarak çeşitlenmektedir. Üretim yöntemlerindeki bu çeşitliliğin temelinde bu teknolojinin çok farklı alanlarda kullanım imkanının olması yatmaktadır.

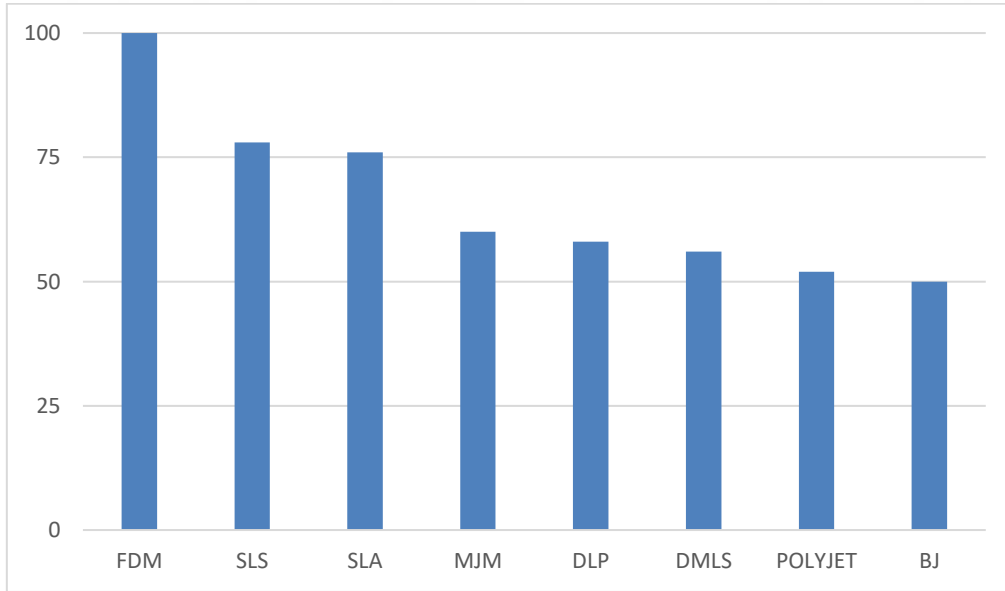
Hızlı prototipleme teknolojisinin endüstride kullanım alanlarını ise %19' u endüstriyel makineler, %18' i havacılık sektörü, %15' i motor parçalarının prototip ve ürün üretimi, %13' ü elektronik parçalar, %11' i protez ve implant üretiminin de dahil olduğu medikal alan, %8' i akademik kurumlar, %6' sı askeri çalışmalarda, %3' ü mimari alandaki çalışmalar oluşturmaktadır. Kişiyeye özel eşya üretimi, hobi amaçlı ve eğitim alanında da %7' lik bir kullanım alanı mevcuttur (Akdoğan, 2019: 20).

Kullanım alanlarının çeşitliliğine bakıldığında hassas ve kritik parçaların kullanıldığı medikal, havacılık sektörlerinde ve elektronik parçaların üretim ve geliştirilmesinin yanı sıra askeri ve mimari çalışmalarda prototip ve ürün üretiminde kullanılmaktadır. Endüstriyel kullanımının ötesinde kolay kullanım yöntemlerinin mevcudiyeti ve kullanımının gerektirdiği teknolojinin birçok insanın hayatında halihazırda bulunuyor olmasının verdiği avantaj ile hızlı prototipleme teknolojisinin günlük yaşamımızda da kullanım alanı giderek genişlemektedir.

1.3. Hızlı Prototipleme Teknolojisi Çeşitleri

- a. Tarayarak Işıklı Kürleme (Stereolithography Apparatus, SLA)
- b. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS)
- c. Eriyik Biriktirme Modelleme Tekniği (Fused Deposition Modelling, FDM)
- d. Tabaka Parça Yapıştırırmalı Parça Üretimi (Laminated Object Manufacturing, LOM)
- e. Polyjet Teknolojisi
- f. Elektron Işınlı Ergitme (Electron Beam Melting, EBM)
- g. Katı Zemin Kürleme (Solid Ground Curing, SGC)
- h. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering, DMLS)
- i. Çok Jetli Modelleme (Multi Jet Modelling, MJM)
- j. Seçici Led tabanlı Ergitme (Selective LED-Based Melting, SLEDM)
- k. Bağlayıcı Jeti (Binder Jetting, BJ)
- l. Dijital Işıklı Kürleme (Digital Light Processing, DLP)

Hızlı prototipleme teknolojisinin kullanım alanının çeşitliliğine göre farklı yöntemler kullanılmaktadır. Şekil 1.2.' de bu yöntemlerin kullanım oranlarına göre dağılımı kullanıcılara yönelik hazırlanan “The State of 3D Printing (2021)” raporuna göre düzenlenerek aktarılmıştır (Sculpteo, 2021: 8).



Şekil 1.2. 2021 yılında en çok tercih edilen üç boyutlu yazıcı teknolojileri

Hızlı prototipleme teknolojisinin kullanılmaya başlandığı yıllardan günümüze kadar geçen zamanda çeşitlenen bu yöntemler arasında, diğerlerine kıyasla daha çok tercih edilen ve teknolojinin yaygınlaşmasıyla kendisine spesifik alanlarda yeni yöntemler doğuran teknikler

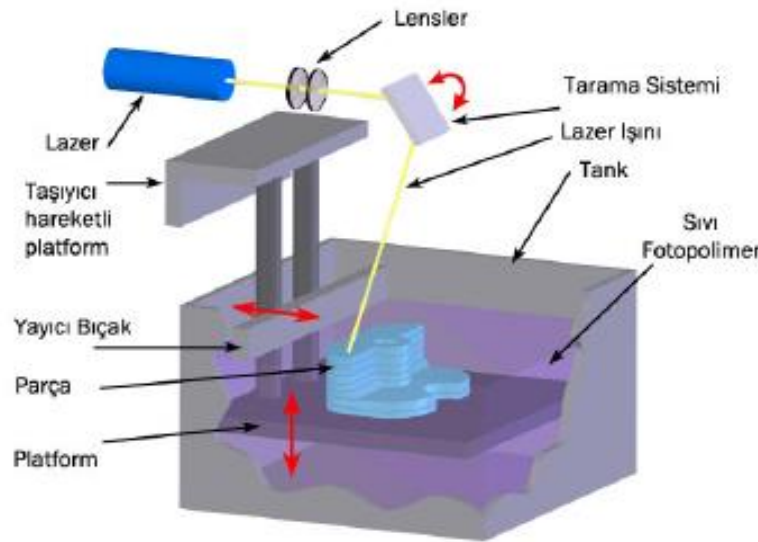
olan Tarayarak Işıklı Kütleme (SLA), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve bu çalışmada da kullanılan Eriyik Biriktirme Modelleme tekniği (FDM) ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

1.3.1. Tarayarak Işıklı Kütleme (Stereolithography Apparatus, SLA)

Hızlı prototipleme teknolojisi serüvenine “3D Systems” firması tarafından 80’lerde ilk olarak bu tekniği kullanarak başlamıştır. Charles Hull’un “Stereolithography Apparatus” adıyla patentini alıp satışa koyduğu ilk sistemler bu tekniği kullanmaktaydı (Kara, 2013: 71).

Stereolithography (stereolitografi), adından da anlaşılacağı üzere matbaacılıkta uzun zamandır iki boyutlu baskılar için kullanılan litografi tekniğinin üç boyuta "stereo" uyarlanmış şeklidir. Bu isim “3D Systems” firması tarafından kullanılmaya başlasa da zamanla rakip firmalarda kendi teknolojilerini aynı isimle adlandırmışlardır.

Bu teknikte, akışkan fotopolimer malzeme, bilgisayar desteği sayesinde lazer ışığı ile vektörel olarak taranarak kür edilip sertleştirilir. Bir tam katman sertleştirildikten sonra fotopolimer malzeme içeren platform bir katman kalınlığı aşağı iner ve yüzey katman kalınlığı kadar olan bölümü tekrar fotopolimer malzeme ile kaplanır. Ardından yüzeyde diğer katmanın taranmasına başlanır ve üst üste eklenerek üretim süreci devam eder. Sırasıyla katmanlar fotopolimer malzemenin yapışma özelliğinden dolayı birbirine tutunarak tasarlanan modeli Şekil 1.3.’de gösterildiği gibi oluşturur (Taormina, 2018: 2).



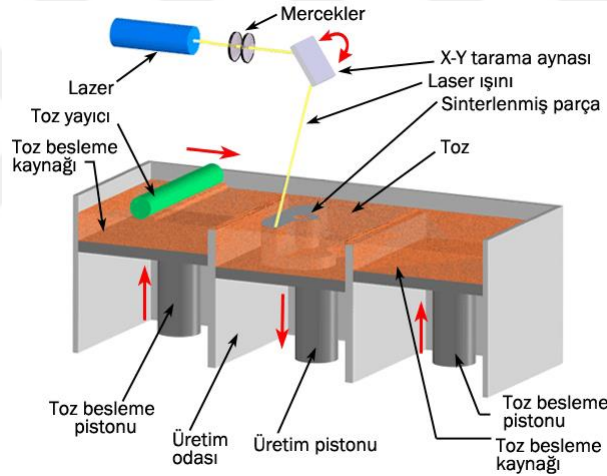
Şekil 1.3. SLA çalışma prensibi

Kaynak: (Çelik vd., 2013: 57)

SLA yönteminin uzun yıllardır yaygın şekilde kullanılmasından kaynaklı kullanım alanı çok geniştir. Bu sebepten bazı kullanım alanlarında istenilen özelliklere göre ilave kürleştirme gerekebilmektedir ve bunlar ultraviyole banyosunda ikincil bir işleme tabi tutulmaktadırlar. Üretim sonrası parçalar temizlenir ve fırınlanırlar. Bu üretim yönteminde düzgün yüzey kalitesine sahip parçalar üretilmektedir (Çelik vd., 2013: 57).

1.3.2. Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS)

SLS yönteminde ısıtıldığında birbiri ile birleşen toz malzeme kullanılır. Modelin üretileceği platform üzerine toz malzeme katman kalınlığı kadar yayıldıktan sonra lazer tarayıcı aracılığıyla bilgisayar desteği ile modelin verilerinden alınan bölgeleri taranır. Taranan bölümlerdeki malzeme sinterlenerek birbirine kaynaması sonucu ilk katman oluşturulur. Katmanlar platformun aşağı hareketi ile toz yayıcı mekanizmanın diğer katmanı hazırlamasıyla üst üste eklenerek Şekil 1.4.' de gösterildiği üzere model inşa edilir.



Şekil 1.4. SLS sisteminin çalışma prensibi

Kaynak: (Çelik vd., 2013: 63)

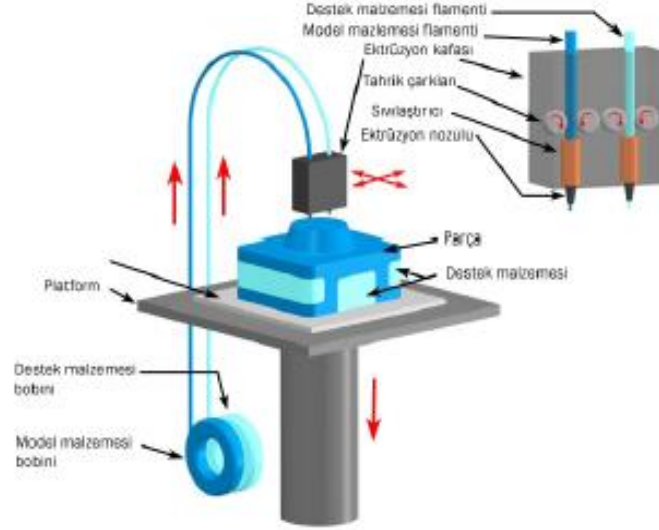
SLS yöntemi poliamid (nylon), polistren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid gibi plastik malzemelerin yanı sıra gelişen teknoloji ile doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) tekniği kullanılarak paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel krom, titanyum gibi metal alaşımları ve doğrudan kalıp için kalıp kumu (alüminyum silikat) gibi seramik malzemeler kullanılmaktadır. Diğer tekniklere kıyasla birçok farklı malzeme ile çalışılabilmesine olanak sağlaması bu yöntemin çok farklı alanlarda kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. SLS tekniği ile mukavemetli parçalar üretilbildiğinden konsept model üretiminde, fonksiyonel parçaların üretiminde, hızlı döküm ve hızlı kalıp için gerekli parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Çelik vd., 2013: 62).

1.3.3. Eriyik Biriktirme Modelleme Tekniği (Fused Deposition Modelling, FDM)

Bu çalışmada kullanılacak olan yöntem olan eriyik biriktirme tekniği hızlı prototipleme teknolojisinin en yaygın kullanım tekniklerinden birisidir. Bu teknik günümüzde endüstri alanındaki kullanımının yanı sıra kullanımının basit ve diğer tekniklere göre maliyetinin düşük olması sebebiyle kendisine ofis, ev ve okullara kadar yayılan bir kullanım alanı yaratmıştır.

Üç boyutlu tasarım programları vasıtasıyla tasarlanan model bu alanda yaygın olarak kullanılan STL (stereolithography) dosya formatı dönüştürülür. Bu dosya formatı tasarlanan modellerin hacim bilgisini üçgen geometrilere bölerek tanımlamakta ve herhangi bir renk, doku veya malzeme bilgisi içermeksizin saklanmasına ve aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Daha sonra modelin bilgilerini içeren STL dosyası Ultimaker Cura, Slic3r, Simplify3D gibi dilimleyici programlara aktarılarak üç boyutlu yazıcıda kullanılacak baskı parametrelerini oluşturulur. Dilimleme programına aktarılan model geometrisinin baskı yüzeyi ölçüleri, katman yüksekliği, baskı sıcaklığı, dolgu şekli ve oranı, model geometrisi için gerekiyorsa destek yapısı oluşturulması gibi çeşitli üretim parametreleri kullanılacak malzeme tipine göre belirlenmektedir. Dilimleme programları üç boyutlu tasarım programlarından gelen hacimsel bilgiyi girilen parametreler doğrultusunda geometrik kodlara (G-code) dönüştürmektedir. Son aşamada ise bu geometrik kod bilgilerini içeren elektronik doküman üç boyutlu yazıcıya aktarılarak tasarlanan modelin belirlenen üretim parametreleri doğrultusunda üretiminin gerçekleştirilmesi sağlanmaktadır.

Bu proseste filament formundaki termoplastik malzeme, ekstruder bölümündeki ısıtılan nozul içerisinden geçirilerek eritilmesi ile şekil 1.5.' de gösterildiği üzere malzemeye şekil verilir. Termoplastik malzeme nozulda ergime sıcaklığının bir miktar üzerine kadar ısıtılır ve şekil verilebilecek esnekliğe getirilmiş olur. Eritilen malzeme, bir step motor yardımıyla itilerek nozuldan geçmeye zorlanır ve baskı tablasına veya önceki oluşturulan katmanlar üzerine eklenerek yapışması sağlanır. Malzemenin nozuldan, nozul çapında akışı sağlandıktan sonra temas ettiği yüzeyde soğuması sonucu katmanlar arası birleşme sağlanmış olur. Aynı zamanda ekstruderin ve tablanın ayrı step motorlar vasıtasıyla, tasarlanan modelin geometrik kodları doğrultusunda hareket ettirilmesiyle her bir katmana erimiş termoplastik akıtılarak katmanlar st üste oluşturulur.



Şekil 1.5. FDM tekniğinin çalışma prensibi

Kaynak: (Çelik vd., 2013: 59)

Eklemeli imalat yönteminde katmanların üst üste eklenmesini sağlayan sistemlerin çalışma prensipleri yaygın olarak kartezyen, delta, polar ve scara olarak sınıflandırılabilir.

Kartezyen yazıcılar genel olarak step motorlar vasıtasıyla yazıcı kafası (ekstruder) ve baskı tablasının birlikte hareket ettiği sistemlerdir. X-Y eksenlerinde hareket eden yazıcı kafası veya baskı tablası ile yatay ekseninde bir katman oluşturulmaktadır. Eklenecek diğer katmanlar baskı tablasının veya yazıcı kafasının Z eksenindeki (aşağı-yukarı) hareketi ile oluşturulmaktadır. Bu tip yazıcıların daha çok hassas yüzey kalitesine sahip parça basımının kritik öneme sahip olmadığı alanlarda kullanımı tercih edilmektedir.

Delta tipi yazıcılar ise eklemeli imalat yönteminde baskı tablasının hareket etmediği, step motorların hareket ettirdiği üç kol sayesinde yazıcı kafasının tüm eksenlerde hareket edebilmesine olanak sağladığı sistemde çalışmaktadır. Bu tip yazıcılarda baskı tablasının sabit olması üretilen parçalarda katman kayma sorunlarını azaltmaktadır.

Polar tip yazıcılar ise baskı yapılacak modelin konumu koordinat sistemi kullanılarak belirlenmesi yerine açı ve uzunluk sistemi kullanılmaktadır. Yazıcı kafası Z ekseninde aşağı yukarı hareket edebilirken baskı tablası X-Y ekseninde dönme hareketi yaparak çalışmaktadır.

Scara tip eklemeli imalat yöntemi ile çalışan yazıcılar ise endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan robot-kol mekanizmalarının hızlı prototipleme teknolojisinin üretim süreçlerine entegre edilmesi ile oluşturulmuştur. Günümüzde diğer yazıcı sistemleri kadar yaygın olmamasına karşın eklemeli imalat yöntemi ile üretilen binaların üretiminde kullanılmaktadır.

Bu teknik ile çok parçalı, hareketli modellerin üretilmesi mümkündür. Tasarlanan modelde istenilen mekanik özelliklere göre ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PLA (Poliaktirk Asit), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified), TPU (Termoplastik Poliüretan), karbonfiber katkılı veya ahşap katkılı özel filamentler kullanılabilir. Üretilen parçalar esnemeye, bükülmeye, kırılma ve uzamaya yüksek dayanımlı, suya ve neme dirençli, düşük maliyetlidir. Bu özellikleri sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde profesyonel veya hobi amaçlı olarak kullanılan üç boyutlu yazıcıların birçoğu bu teknik ile çalışmaktadır.



2. MEKANİK TESTLER

Statik veya dinamik olarak uygulanan dış kuvvetlerin etkisi altındaki malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği davranışlara mekanik özellik denilmektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi kullanım alanlarının ve amaçlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ürünlerin kullanım ömürleri artırılması veya kullanım şartlarının iyileştirilmesi için kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin dikkate alınması önemlidir. Doğru üretim yönteminin belirlenmesi ve üretim verimliliğinin artırılması açısından da mekanik özelliklerin bilinmesi ve bu özelliklerin iyileştirilmesi önemlidir.

Malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen temel unsur atomlar arası bağ kuvvetleridir. Bunun yanında malzemenin iç yapısı da mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bundan dolayı malzemenin iç yapısında değişiklikler yapılarak farklı mekanik özellikler elde etmek veya bu özelliklerde iyileştirmeler yapmak mümkündür.

Malzemeye bir dış kuvvet etki ettiği zaman malzemede gerilmeler meydana gelmektedir. Meydana gelen düşük gerilmeler altındaki şekil değiştirmeye elastik şekil değiştirme, belirli bir sınırın üzerinde uygulanan dış kuvvetlerin etkisiyle oluşan gerilmeler sonrasında oluşan kalıcı şekil değiştirmeye de plastik şekil değiştirme denilmektedir.

Malzemelere uygulanan mekanik testler statik yük altında ve dinamik yük altında yapılan deneyler ile uygulanmaktadır. Statik yükler altında yapılan deneyler; çekme deneyi, basma deneyi, eğme deneyi, burulma deneyi, sertlik deneyi, sürünme deneyi olarak sınıflandırılabilir. Dinamik yükler altında yapılan deneyler ise yorulma ve çentik darbe deneyi olarak sınıflandırılabilir.

Burulma deneyi, malzemelerin kayma modülü (G) ve kayma akma gerilmesi (τ_A) gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanır. Burulma deneyi, iki ucundan sıkıştırılmış numuneye, bir ucu sabit olmak kaydıyla diğer ucundan burulma momenti uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Uygulanan burulma momenti etkisiyle numunede kayma gerilmeleri oluşmaktadır (Dieter vd., 2003: 86).

Metalik malzemelerin burulma deneyi, genelde malzemelerin büyük plastik gerilmelerde akma karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu deney yöntemine plastik deformasyonla alakalı teorik çalışmalarda ve metallerin çekilebilme, dövülebilme özelliklerinin tespit edilmesi gibi mühendislik uygulamalarında başvurulmaktadır (Dowling, 2007: 172).

Malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç, sertlik olarak tanımlanmaktadır. Sertlik deneyleri malzemelerin ve imal edilmiş parçaların tahribatsız olarak ve hızlıca kontrolünü sağlayan önemli bir deneylerdir. Sertlik ölçme prosesi standart bir batıcı ucun malzemeye batırıldığında malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri, numunelerin üzerinde elde edilen kalıcı iz büyüklüğünün ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Genel olarak malzemenin sertlik değeri numunedeki kalıcı iz büyüklüğü ile ters orantılıdır (Callister vd., 2013: 191).

Bir diğer statik yük altında yapılan deney sürünme deneyidir. Bir malzemenin sabit bir yük veya gerilme altında uğradığı plastik deformasyonun zamana bağlı değişimi sürünme olarak tanımlanmaktadır. Sürünme deneyi genellikle sabit sıcaklık ve sabit yük altında yapılmaktadır. Standartlara göre hazırlanmış numunenin iki tarafı test cihazının çenelerine bağlanır ve tüm sisteme belirlenen değerle ısı ve yük uygulanır. Malzemenin bu şartlar altındaki gerinim değeri zamana bağlı olarak ölçülerek deney yapılmaktadır. Malzeme cinsi, sıcaklık, yükleme cinsi ve miktarı malzemenin sürünme davranışını etkileyen başlıca faktörlerdir (Hosford, 2005: 259).

Dinamik yükler altında yapılan deneylerden birisi yorulma deneyidir. Yinelenebilir gerilme altında çalışan metal parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmasına rağmen belirli bir tekrarlamalı sayısı sonunda metal yüzeyinde bir çatlama ve bu çatlama sonucunda metalde kopma olayına neden olur ve bu olaya da yorulma adı verilmektedir (Hosford, 2005: 297).

Yorulma dayanımı genellikle Wöhler yöntemiyle saptanır. Bu yöntemde, deney numuneleri farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın oluştuğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisi sonunda elde edilen veriler doğrultusunda Wöhler eğrisi (S-N, Gerilme-Ömür eğrisi) elde edilir.

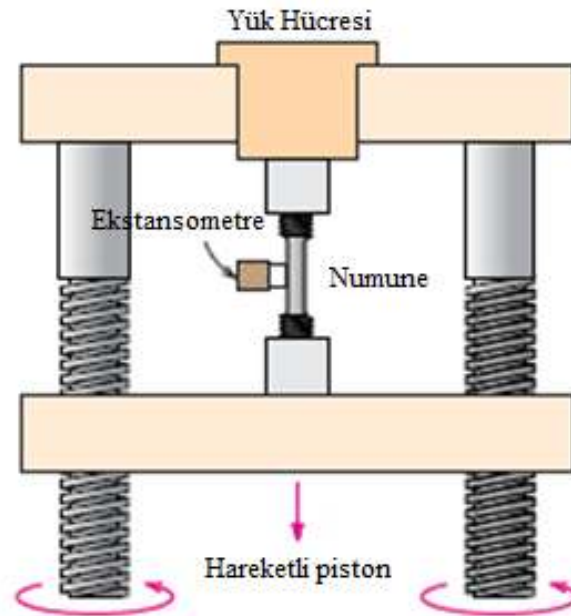
Çentik darbe deneyinde isminden de anlaşılacağı üzere test edilecek malzeme numunesinde üç boyutlu gerilme sağlamak amacıyla çentik açılmaktadır. Ucunda belirli ağırlığa sahip olan sarkaç belirli yükseklikten serbest bırakılarak numunenin çentik açılan bölgesinden kırılması sağlanır. Numuneyi kıran sarkaç kalan potansiyel enerjisi ile belirli bir yüksekliğe kadar daha hareket eder. Sarkaçtaki potansiyel enerji değişiminden yararlanılarak, standart çentik içeren numunenin dinamik bir yük altında kırılması için gereken enerji hesaplanmaktadır. Tespit edilen bu değer malzemenin darbe direnci olarak tanımlanmaktadır (Savaşkan, 2021: 359).

Malzemelere uygulanacak mekanik testler tercih edilirken malzemelerin kullanım alanı, malzeme cinsi, kullanım ömrü, üretim yöntemi gibi birçok etken göz önünde bulundurulmaktadır. Malzemenin görevi ve malzemeden istenilen özelliklere göre de bu testler kendi içerisinde özelleştirilebilmektedir. Bu çalışmada üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen malzemelere çekme, basma ve üç nokta eğme deneyleri uygulanmıştır.

2.1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi metalik ve metalik olmayan malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Çekme deneyi, malzemenin en temel mekanik özellikleri hakkında bilgi veren bir deney olması sebebiyle testlerden alınan veriler; mühendislik uygulamalarında malzeme seçiminde, malzemelerin gerekli kalite standardının sağlanıp sağlanmadığının kontrolünde, yeni malzeme ve proseslerin geliştirilmesinde, farklı malzemelerin kıyaslanmasında ve kullanım koşullarında malzemelerin davranışlarının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Davis, 2004: 1).

Numunelere uygulanan çekme testinden elde edilen veriler doğrultusunda elastisite modülü, akma dayanımı ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikleri tespit edilebilmektedir. Çekme testi cihazının çalışma prensibi genel olarak Şekil 2.1.'deki gibidir (Callister vd., 2013: 170).

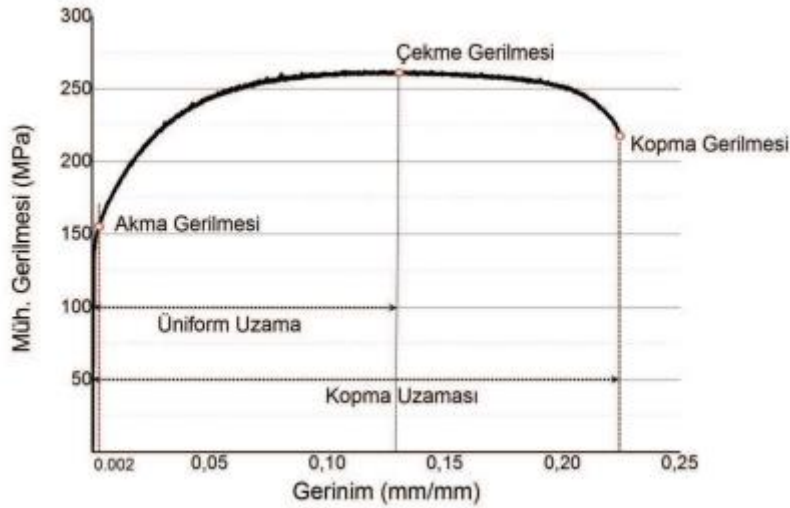


Şekil 2.1. Çekme cihazı çalışma prensibi

Kaynak: (Callister vd., 2013: 172)

Çekme deney cihazı biri sabit diğeri numuneyi sabit hızda artan bir kuvvet ile çekecek şekilde tasarlanmış iki çeneden ve bu esnadaki uzama, kopma, uygulanan kuvvet değeri, zaman gibi parametreleri kaydedebilen bir sistemden oluşmaktadır. Cihazın çenelerine bağlanan test numunelerine uygulanan eksenel kuvvetler ile numunenin boyundaki meydana gelen uzama verilerini kullanarak cihaz tarafından Kuvvet-Uzama eğrisi oluşturulur. Bu veriler kullanılarak malzemenin mekanik özellikleri ve ürünün tasarım kriterleri belirlenir (Budynas ve Nisbett, 2011: 32).

Numunelere uygulanan çekme testinden elde edilen kuvvet ve uzama verilerinden gerilme ve gerinim grafiğine ulaşılır. İstenilen mekanik özelliklerin tespit edilmesinde gerilme-gerinim grafiği kullanılmaktadır. Şekil 2.2.' de gerilme-gerinim grafiği ve mekanik özelliklerin grafik üzerindeki gösterimi verilmiştir (Sönmez, 2015: 27).



Şekil 2.2. Örnek bir gerilme-gerinim eğrisi

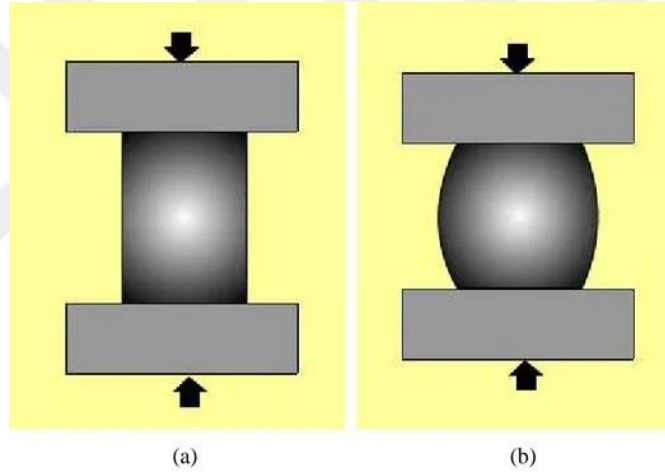
Kaynak: (Sönmez, 2015: 29)

Çekme testine tabi tutulacak malzemenin tespit edilmek istenilen özelliğine ve kullanım şartlarına göre yüksek sıcaklıklarda veya düşük sıcaklıklarda çekme testi uygulanabilmektedir. İstenildiğinde malzeme test öncesi fırınlanarak veya soğutularak farklı sıcaklıklarda teste tabi tutulmaktadır. Bu sayede sıcaklık değişiminin malzemenin mekanik davranışlarına etkisi de öğrenilebilmektedir. Benzer şekilde malzemeye uygulanacak deney tipi veya koşulu değiştirilerek farklı deformasyon hızlarında çekme testine tabi tutularak farklı hızlar altındaki mekanik davranışları da öğrenilebilmektedir.

2.2. Basma Deneyi

Basma deneyi, statik yükleme şartları altında numunelere basma kuvveti uygulanarak mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır. Yükün uygulanması ve bunun numune üzerindeki etkileri açısından çekme testinin tam tersidir. Bu sebepten genellikle gevrek malzemelerin sünekliğinin ölçümünde çekme deneyi yerine basma deneyi tercih edilmektedir. Basma testi uygulanan numunenin malzemesinin şekil değişimi, basma akma mukavemeti, basma mukavemeti, basma elastisite modülü, % kesit değişimi gibi mekanik özelliklerine ulaşılabilir (Dowling, 2007: 153).

Test cihazının iki basma kafası arasına yerleştirilen numuneye sabit hızla artan basma yükü uygulanmaktadır. Uygulanan kuvvet sonucunda numunenin boyunda kısalma meydana gelirken numunenin kesit alanında da genişleme meydana gelmektedir. Bu durum sünek malzemelerde Şekil 2.3.' de gösterildiği gibi fiçi oluşumlarına sebep olmaktadır.



Şekil 2.3. Basma kuvveti uygulanan malzemelerdeki fiçi oluşumu a) fiçi oluşumunun ilk aşaması b) fiçi oluşumunun tamamlanması

Kaynak: (Erdem, 2015: 50)

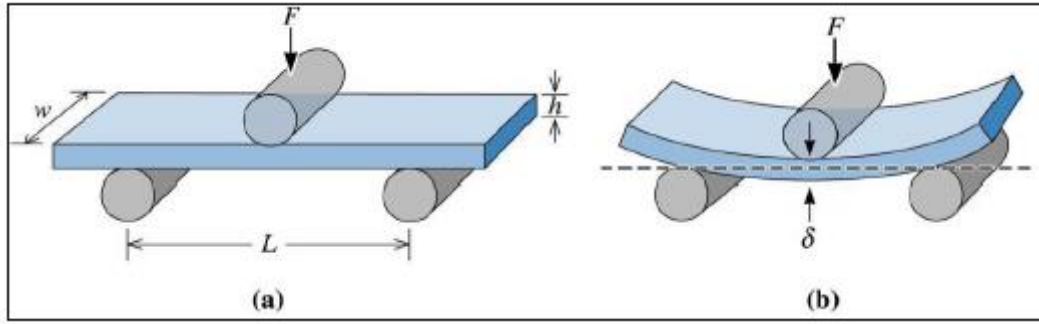
Sünek malzemeler kırılmadan deforme olurken gevrek malzemeler genellikle deney esnasında kayma ile kırılarak deforme olmaktadır. Yarı gevrek malzemelerin deney esnasında kırılması ise koni şeklinde gerçekleşmektedir.

Numuneye uygulanan deney sonucunda test cihazı tarafından basma yükü ve kısalma eğrisi oluşturulur. Bu verilerden oluşturulan grafik çekme deneyinde elde edilen yük-uzama eğrisi ile benzerdir. Fakat eksenler bu verilerde basma yükünü ve bu yük sonucunda numunede oluşan boy kısalmasını temsil etmektedir. Basma yük-kısalma grafiği doğrudan kullanılmayıp mühendislik basma gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişimi değerlerine dönüştürülür.

2.3. Üç Nokta Eğme Deneyi

Eğme, genellikle iki desteğe serbest olarak oturtulan daire veya dikdörtgen kesitli düz bir numunenin, ortasına aynı yönde bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan şekil değiştirmesidir. Çeşitli eğme deneyi yöntemleri olmasına karşın en yaygın olarak uygulanan üç nokta eğme deneyidir. Bu yöntemlerde amaç numunede çatlama meydana gele kadar eğme işlemine devam etmektir. Üç nokta eğme testi, eğilmeye maruz kalan tüm makine parçalarında kullanılan dökme demir, kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli çelikler gibi kırılman ve gevrek malzemelerin mekanik özelliklerin tespitinde kullanılmaktadır (Dowling, 2007: 169).

Üç nokta eğme testinin temel prensibi, deney uygulanacak numuneyi basit kiriş modeli olarak kabul etmeye dayanmaktadır. Test uygulanacak numune yatay pozisyonda destekler üzerine yerleştirildikten sonra Şekil 2.5.' de gösterildiği gibi numune üzerine tam orta noktasından uygulanan artan bir F kuvvetinin oluşturduğu sehim değeri ölçülür (Morgül, 2015: 3).



Şekil 2.4. Üç nokta eğme numunesine uygulanan kuvvet ve numunede oluşan sehim

Kaynak: (Morgül, 2015: 3)

Uygulanan kuvvetin en fazla olduğu nokta olan malzemenin orta noktasından ölçülen değerler vasıtasıyla deney numunesinde kuvvetin sebep olduğu sehim miktarı ölçülür. Numuneye uygulanan üç nokta eğme testi sonucunda malzemeye dair kuvvet ve sehim verileri elde edildikten sonra bu veriler kullanılarak malzemenin elastisite modülü, kırılma dayanımı gibi mekanik özellikleri tespit edilmektedir.

Genel olarak malzemelere uygulanan bu gibi mekanik deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmektedir. Belirlenen mekanik özellikler ilgili malzemelerin kullanım alanlarını ve malzemelere verilecek görevleri tespit edilmesinde önemlidir. Bu sebepten üretilecek ürünler için daha tasarım aşamasında üründe kullanılacak malzemelerin tespiti üretimde kullanılacak yöntemlerin seçimini ve ürünün kullanım ve çalışma alanlarının belirlenmesinde belirleyici olmaktadır. Hem ilk üretimde hem

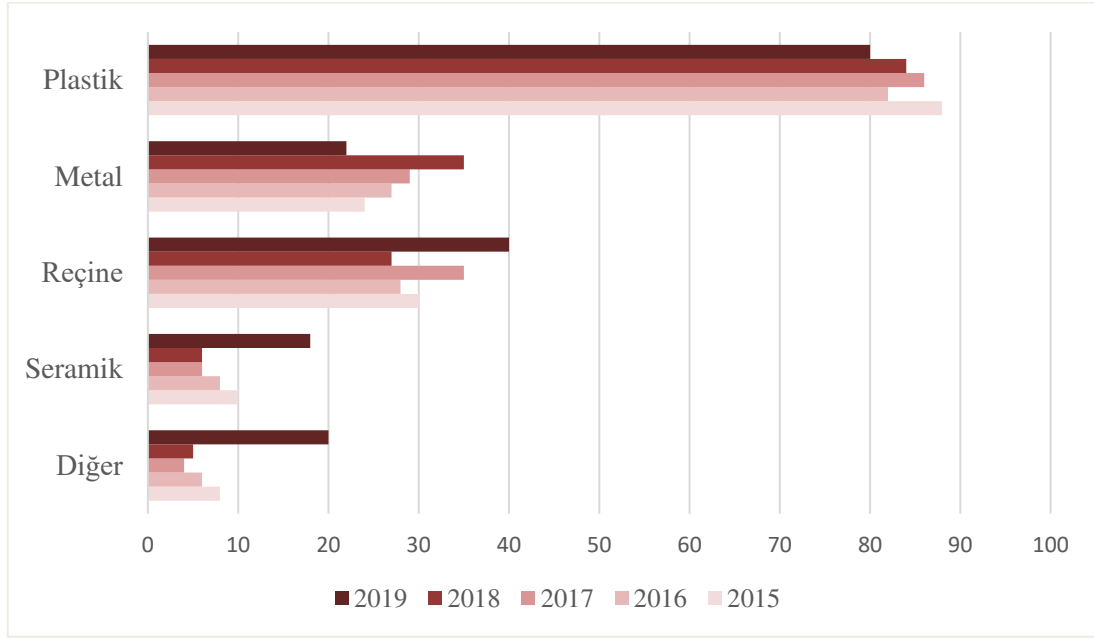
de üretim aşamalarının geliştirilmesi ve iyileştirilmesi aşamasında böylesine kritik bir seçimin sağlıklı yapılabilmesi için malzemelerin amacına uygun şekilde uygulanacak mekanik testler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak karar verilmektedir.



3. HIZLI PROTOTİPLEME TEKNOLOJİSİ PROSES PARAMETRELERİ

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemi Proses Parametreleri

Hızlı prototipleme teknolojileri üretim yapılacak alana göre farklı malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler nihai üründen istenilen mekanik özelliklere ve kullanılacak alana göre tercih edilmektedir. Bu malzemeler arasından kullanıcılar tarafından en çok tercih edilenler “The State of 3D Printing (2019)” raporuna göre düzenlenerek Şekil 3.1.’de aktarılmıştır (Sculpteo, 2019: 8).



Şekil 3.1. Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinde 2015-2019 yılları arasında en çok tercih edilen malzemeler

Hızlı prototipleme teknolojilerinin genelinde üretilecek ürüne göre malzeme tercihi ve uygun yöntem seçiminden sonra üretilecek ürüne dair üretim parametreleri belirlenmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilecek ürünler tabla üzerinde üretime başlayarak Z ekseninde aşağıdan yukarıya doğru katmanların üst üste eklenmesi ile oluşturulmaktadır. Bu proseste elde edilecek ürünün özelliklerini doğrudan etkileyebilecek birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler dilimleme programları vasıtasıyla belirlenmektedir. Üretim parametreleri belirlenirken kullanılan malzemede büyük öneme sahiptir.

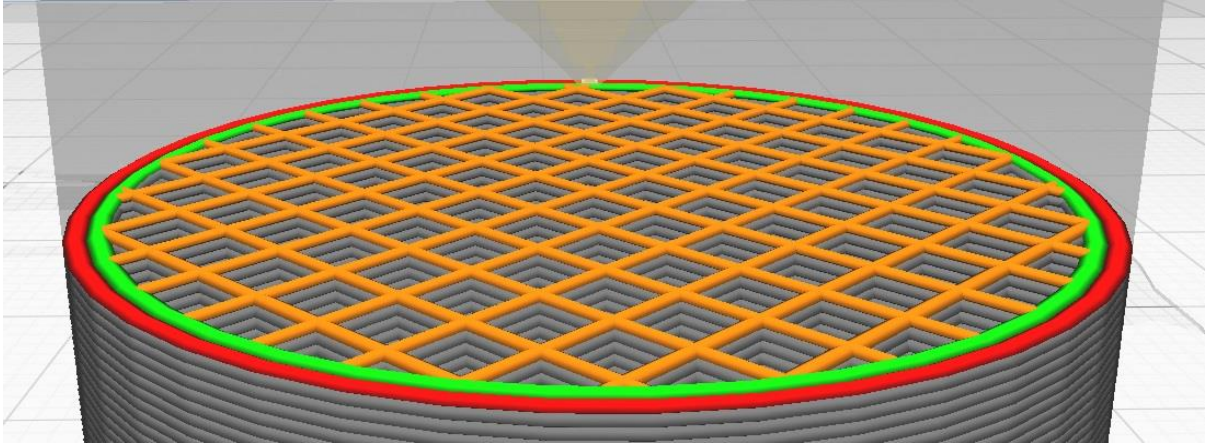
Eklemeli imalat yöntemi, üretilecek ürünün kullanılacağı alana göre çok farklı malzemeler ile çalışılabilmesine olanak sağladığı gibi en çok tercih edilen malzemeler PLA ve ABS termoplastik malzemeleridir. Bu malzemelerin erime ve tabla sıcaklıklarına dair yaygın olarak kullanılan üretim parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. PLA ve ABS malzemeden üretilen filamentlerin proses parametreleri

Özellikler	PLA		ABS	
Filament Çapı (mm)	1,75	2,85	1,75	2,85
Erime Sıcaklığı (°C)	190 - 220	200 - 220	220 – 240	220 - 260
Tabla Sıcaklığı (°C)	0 – 80	0 – 80	80 – 100	100 - 110

Belirlenen sıcaklıklarda eritilen termoplastiğin tablaya aktarıldığı uçta akışkanın yönünü veya özelliklerini kontrol etmek için nozul adı verilen parçalar kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcılarda katman kalınlığını belirleyen bu nozullar genellikle değişken kesit alanına sahip bir boru veya tüptür. Kullanılacak nozulun ölçüleri üretilcek ürünün ve baskı yapılacak yazıcının özelliklerine göre değişmektedir. Kullanılan nozulun çapına göre de üretilcek ürünün katman yüksekliğinin sınırları belirlenmektedir.

Eklemeli imalat yönteminde üst üste eklenerek yapılan imalattan dolayı en önemli proses parametrelerinin başında katman yüksekliği gelmektedir. Şekil 3.2’de gösterildiği üzere üst üste eklenecek bölümlere katman adı verilmektedir. Bundan dolayı katman yüksekliği ürünün yüzey kalitesini doğrudan etkileyen bir parametre olmaktadır.

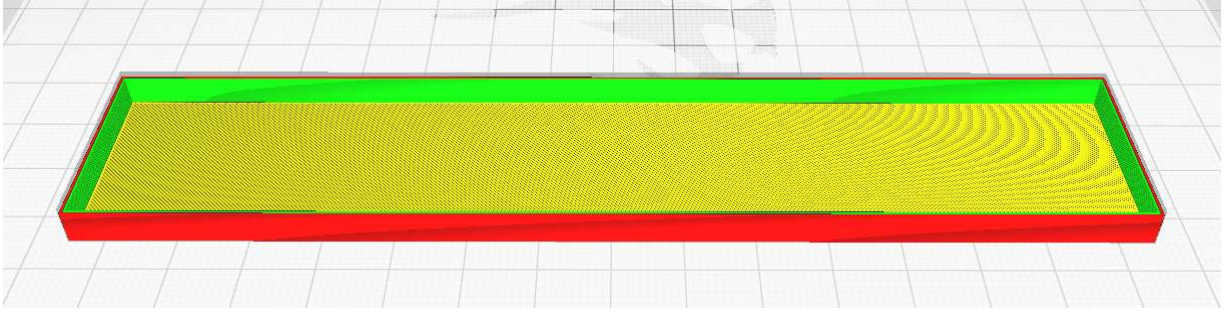


Şekil 3.2. Eriyik biriktirme yöntemiyle üretimde oluşturulan bir katman

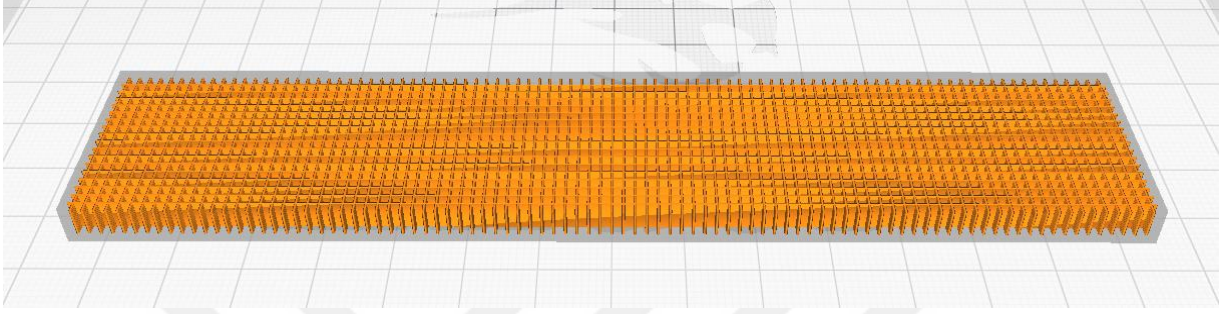
Üretilcek ürünün toplam yüksekliği belirlenen katman yüksekliği ölçüsünün tam katlarında olması ürünü üretilirken oluşturulacak katman sayısının eşit ve dolayısıyla her bir katmanında aynı yükseklikte olmasını sağlamaktadır.

Katmanların üst üste eklenerek ürünlerin üretildiği bu yöntem ile üretilen ürün farklı bölümlerden meydana gelmektedir. Bu bölümlerden birisi olan ürünün kabuk bölümü şu şekilde ayrılmaktadır; parçanın baskı tablasına temas eden yüzeyi alt katman, parçanın en üst yüzeyi ve son işlem göreceği alanı olan kısım üst katman ve yan dış yüzeylerini oluşturan yapıda duvar olarak adlandırılmaktadır. Bu kabuk geometrisinin içinde kalan hacmi malzeme ile dolduracak yapı ise dolgu olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.3.' de alt katman, duvar ve dolgu bölümlerinin dilimleme programındaki görselleri verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda proses parametresi olarak alt ve üst katman sayıları ile duvarları oluşturacak katmanların sayıları belirlenmektedir. Bu değerlere bağlı olarak da kabuk içerisinde oluşturulacak olan dolgu bölümünün katman sayıları belirlenmektedir.

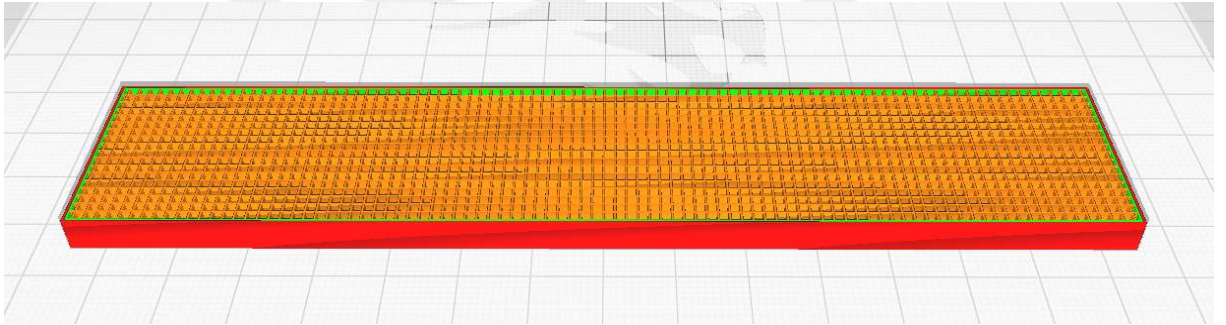




(a)



(b)

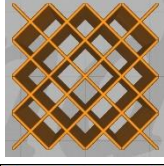
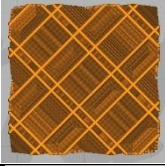
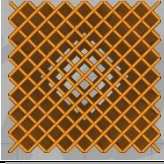
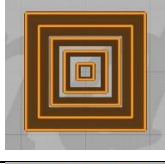
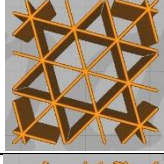
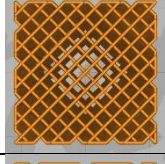
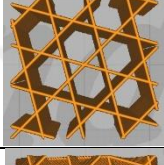
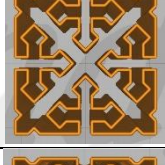
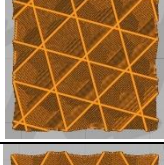
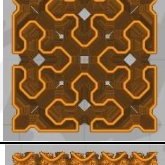
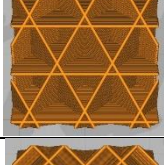
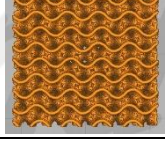
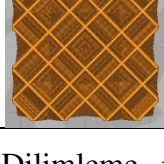


(c)

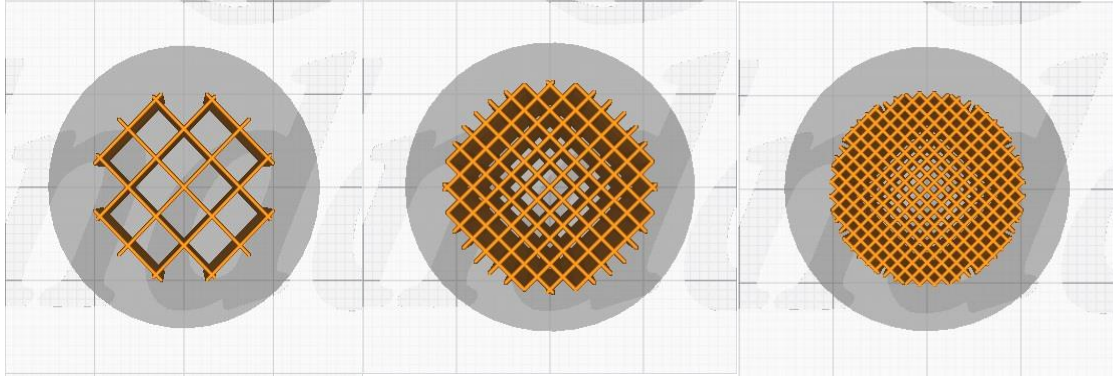
Şekil 3.3. a) Alt katman ve duvarlardan oluşan kabuk görünümü b) Dolgu c) Alt katman, duvarlar ve dolgu görünümü

Üretilcek ürünün bölümlerinden birisi olan dolgu bölümünü oluşturan dolgunun katman sayısının yanı sıra dolgu geometrisi ve dolgu yoğunluğu da önemli proses parametreleridir. Ürünün mekanik özelliklerine doğrudan etki eden bu parametreler için dilimleme programlarında farklı özelliklerde geometriler tanımlanmaktadır. Nihai ürünün kullanılacağı yere ve üründen istenilen özelliklere göre dolgu geometrisi belirlenmektedir. Yaygın kullanılan dilimleme programlarından biri olan Ultimaker Cura programında bulunan dolgu geometrilerinin aynı dolgu yoğunluğundaki görselleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Dolgu geometri çeşitlerinin aynı dolgu doluluk oranındaki görüntüleri

	Grid (Izgara)		Quarter Cubic (Çeyrek kübik)
	Lines (Çizgiler)		Concentric (Eşmerkezli)
	Triangles (Üçgenler)		Zig Zag
	Tri-hexagon (Üçlü altıgen)		Cross (Çapraz)
	Cubic (Kübik)		Cross 3D (Çapraz 3D)
	Cubic Subdiv. (Kübik alt bölüm)		Gyroid
	Octet (Sekizli)		

Dilimleme programında belirlenen dolgu yoğunluğu parametresi ürünün dolgu yapılacak bölgesindeki birim hacme harcanacak olan malzemeyi belirlemektedir. Bu sebepten bu değerin artması harcanacak malzemenin ve ürünün üretim süresinin artmasına sebep olmaktadır. Dilimleme programında aynı geometrideki bir modelin farklı dolgu yoğunlukları ile oluşturulmuş dolgu bölümü görselleri Şekil 3.4.' de gösterilmiştir.

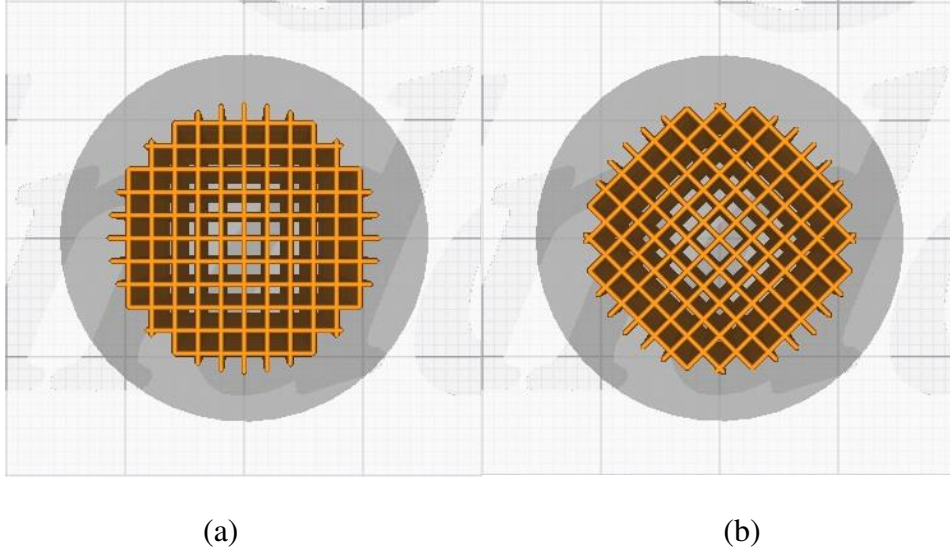


Şekil 3.4. Sırasıyla %20 – %45 – %80 dolgu doluluk oranları

Tasarlanan modelin eklemeli imalat yöntemleri ile üretimi aşamasında dilimleme programları aracılığıyla belirlenen diğer bir proses parametresi baskı hızıdır. Kullanılan malzemeye ve üretimde kullanılan üç boyutlu yazıcının teknik özellikleri baskı hızı skalasını belirlemektedir. Katmanlar üst üste inşa edilirken ekstruderin izleyeceği yol üzerindeki hızını belirleyen bu parametrenin artırılması üretim süresini azaltırken bazı geometrilerde üretim kalitesini düşürmektedir. Baskı hızının artırılması ürünün yüzey kalitesinde azalmalara yol açmasının yanı sıra katmanların birbirine yapışmaması gibi sorunlarda doğurmaktadır. Bu sorunlarda ürünün mekanik özelliklerine doğrudan etki yapmaktadır.

Kabuk ve dolgu bölümleri için üretim sürecinde belirlenen katman sayısı ve dolgu yoğunluğuna dair üretim parametrelerine ilave olarak bu bölümler oluşturulurken ekstruderin izleyeceği yoldaki yönlerde belirlenmektedir. Dilimleme programlarının temel olarak önerdiği açılar üretilecek ürünün geometrisine ve kullanım alanına göre değiştirilmektedir. Kabuk bölümündeki alt ve üst katmanlar oluşturulurken ekstruderin izleyeceği desendeki çizgiler genelde varsayılan olarak 45° ve 135° açı ile oluşturulmaktadır.

Dolgu bölümünde tercih edilen geometrik desene göre değişmekle birlikte dilimleme programlarında farklı açılar tercih edilmektedir. Dolgu hattı yönleri olarak tanımlanan bu proses parametresi dolgu bölümündeki yoğunluk ve geometrik desen farklılıkları ile birlikte ürünün iç yapısını değiştiren parametrelerdir. Dolayısıyla bu değişikliklerin üretilecek ürünün mekanik özellikleri üzerinde etkisi olacaktır. Şekil 3.5.' de iki farklı dolgu hattı yönü ile tasarlanmış modelin dolgu görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Dolgu bölümü a-0, b-45 derecelik açılar ile tasarlanan modelin görüntüsü

Proses parametrelerinin belirlenmesinde modelin üretim yapılacak yazıcının tablasına nasıl konumlandırılacağı da büyük önem arz etmektedir. Ürün üst üste ekleyerek üretileceğinden dolayı model geometrisinin bu işleme uygun şekilde tablada konumlandırılması gerekmektedir. Üretilecek modelin tablaya teması olmayan bölgelerinde destek yapıları oluşturulması gerekmektedir. Üretim sonrasında bu destek yapıları üründen sökülerek nihai ürün elde edilmektedir. Destek yapıları oluşturulması ilave malzeme, enerji ve zaman kaybı yarattığından dolayı üretilecek modelin minimum destek yapısına ihtiyaç duyacak şekilde tablada konumlandırılması önem arz etmektedir.

Bu bilgiler ışığında tasarlanan modelin eklemeli imalat yöntemi ile üretiminde dilimleme programında proses parametreleri doğru şekilde belirlenmesi üretimde harcanacak malzeme, enerji ve zamanın verimli kullanılmasına sebep olacaktır.

3.2. Literatür Araştırması

Hızlı prototipleme teknolojisi ile üretilen ürünlerin kullanılan hammaddenin mekanik özelliklerini ne kadar taşıdığı veya ürünlerin mekanik özelliklerinde değişim varsa buna neyin sebep olduğu bu teknoloji kullanılmaya başlandığından beri araştırılmaktadır. Bunun için kullanım alanlarına göre hızlı prototipleme yöntemiyle üretilen parçaların gerekli şartları sağladığının test edilmesi gerekmektedir. Farklı üretim metotları ve malzemeler olmasına karşın bu literatür araştırmasında eklemeli imalat yöntemi ile termoplastik malzemeler kullanılarak üretilen ürünlerin mekanik davranışlarının incelendiği çalışmalar araştırılmıştır.

Farklı yönlerde üretilen standart çekme testi numunelerine uygulanan testler Alberto Dal Maso ve arkadaşları tarafından değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarında yığma hızlı prototipleme yöntemiyle üretilen parçalarda, üretilen modeldeki malzeme dağılımının ve homojenliğin dayanıma etkisi incelenmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile üretilen numunenin geometrik özellikleri aynı olmasına karşın üretimde kullanılan aç ve yönün çekme dayanımına, elastisite modülüne ve uzamaya doğrudan etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir (Maso ve Cosmi, 2018: 26739–26746).

Hızlı prototipleme yöntemleri ile üretim yapılırken baskı yönü veya modelin baskı tablası üzerindeki konumunun üretilen modelin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden olduğu düşünülmektedir. Yee Ling Yap ve arkadaşları çalışmalarında üç farklı konumda ve iki farklı dokuma açısı içeren test numuneleri üretmiştir. Bu numunelere dört nokta eğme testi, ultrasonik testler ve çentik darbe testi uygulamışlardır. Uygulanan testler sonucunda yatay eksene paralel olarak baskı tablasına yerleştirilerek üretilen numunelerin diğerlerine kıyasla daha mukavim olduğu tespit edilmiştir (Yap vd., 2019: 121–133).

Hızlı prototipleme teknolojisi ile üretilen parçalar numune, prototip veya kalıp olabileceği gibi nihai ürünlerin üretildiği üretim alanları mevcuttur. Bundan dolayı ürünün mekanik özelliklerinin yanı sıra termofiziksel özelliklerinin de araştırılması önem kazanmıştır. E. Bartolomé ve arkadaşları çalışmalarında ABS malzemeden üretilen modellerin düşük sıcaklıktaki mekanik ve manyetik davranışlarını araştırmışlardır. Bu araştırmaya göre ABS malzemeden üretilen numunelerin düşük sıcaklıkta kırılma geometrisinin üretim esnasındaki dokuma açısına göre değiştiği gözlemlenmiştir. Kırılma dayanımının üç boyutlu yazıcı ile üretilen numunede çok daha düşük iken katı ABS malzemeden talaş alınarak üretilen aynı numunede mukavemetin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan testler sonucunda üç boyutlu yazıcı ile üretilen numuneler ile katı malzemeden talaş alınarak üretilen numunelerin manyetik özelliklerinde fark olmadığı tespit edilmiştir (Bartolomé vd., 2017: 30–37).

Wang ve arkadaşları hızlı prototipleme yöntemleri ile üretilen ürünlerdeki porozitenin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Eklemeli imalat yöntemi ile katman kalınlıkları sabit fakat üretim yönleri farklı olan numuneler üreterek çekme testleri uygulamışlardır. Yapılan testler sonucunda üretim esnasındaki dokuma yönünün porozite ve mekanik özellikler üzerine etkisi olduğunu tespit etmişlerdir (Wang vd., 2019: 17).

Durgun ve arkadaşı çalışmalarında eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi konusunda üretim parametrelerinin optimizasyonunu araştırmışlardır. Yaptıkları testlerde üç farklı parça varyasyonunu beş farklı kafes açısı ile üreterek bu numunelerin eğme dayanımı, çekme dayanımı ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Uygulanan testler sonucunda kafes açısı ve parça yönlenmesinin numunelerin mekanik özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir (Durgun ve Ertan, 2014: 228–235).

Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim süresinin kısaltılması ve üretim maliyetinin düşük tutulması açısından parçaların üretim hacmi ve baskı tablası üzerindeki yerleşiminin önemi olduğu açıktır. Bu konuda Xu ve arkadaşları araştırmalarında örnek bir parça geometrisi için dört farklı eklemeli imalat yönteminde parçaları üç farklı yönlenme ile yerleştirerek üretmiş ve çıkan sonuçları kullandıkları yöntemler arasında karşılaştırmışlardır (Xu vd., 1999: 54-60).

Ahn ve arkadaşları çalışmalarında eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalarda üretim katmanlarının yönlerine bağlı olarak ortaya çıkan anizotropinin parçanın mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda üretimde kullanılan hangi yönün hangi zorlanma durumlarına karşı daha avantajlı olduğu gösterilmiştir (Ahn vd., 2002: 248-257).

Shubham ve arkadaşları çalışmalarında ABS malzeme kullanarak farklı katman kalınlıklarında üretilen numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı katman kalınlığındaki numunelere uygulanan testler sonucunda kalınlıktaki artışın mekanik özellikler üzerinde negatif etkisi olduğu tespit edilmiştir. İnce katmanlar kullanılarak üretilen numunelerin sertlik ve dayanımlarının kalın katmanlara sahip olanlara kıyasla daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir (Shubham vd., 2016: 63-67).

Eklemeli imalat yönteminin kullanıldığı tüm alanlarda ürünlerin boyutsal doğruluğu önem arz etmektedir. Lieneke ve arkadaşları çalışmalarında belirli ölçülerde fakat farklı doğrultularda numuneler üretmiş ve üretim sonrası yaptıkları ölçümlerle boyutsal toleransları belirlenmesi üzerine incelemeler yapmışlardır. Bu çalışmalara göre üretim sürecinde belirlenen

parametrelerin farklı boyutsal sapmalara sebep olabileceğini tespit etmişlerdir (Lieneke vd., 2016: 286–291).

Eklemeli üretim yöntemi (FDM) ile üretilen modellerde proses parametrelerinin, cismin mekanik özelliklerine etkisini inceleyen Akdoğan, dokuma yoğunluğu ve dokuma açılarını değiştirerek ABS cinsi termoplastik malzeme ile üretilen modellere mekanik testler uygulamıştır. Test numunelerini tam dolgu, yüksek yoğunluklu dolgu ve düşük yoğunluklu dolgu oranları ve 0, 30, 45, 75 derecelik açılar ile üretmiştir. Uygulanan testler sonucunda düşük dolgu yoğunluğu ile üretilen numunelerin çekme mukavemetinin düşük, eğme durumunda ise dolgu oranı yüksek olan numunelere göre daha esnek olduğu tespit edilmiştir. Farklı dokuma açıları ile üretilen numunelerin ise 0 ve 45 derecelik üretilen numunelerin kullanılan hammaddenin mekanik özelliklerine daha yakın sonuçlar verdiği diğer numunelerin ise daha düşük mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir (Akdoğan, 2019: 30).

Prototip imalatını eriyik biriktirme yöntemi ile yaptıkları çalışmalarında Evlen ve arkadaşları %10, %20, %30, %40 ve %50 dolgu oranlarında PET ve PLA malzemenin ürettikleri numunelere mekanik testler uygulayarak bu değişimin malzemenin mekanik davranışlarına etkisini tespit etmeye çalışmışlardır. Numuneler uygulanan çekme testlerinin sonucunda malzemenin sertlik değerinin dolgu oranı ile doğru orantılı olduğu ve pürüzlülük ile çekme değerlerinin ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir (Evlen, 2019: 1031).

Çiçek yaptığı çalışmada eriyik biriktirme yöntemi ile ABS ve PLA malzeme kullanarak farklı dolgu oranlarında ürettiği test numunelerine çekme deneyi uygulamıştır. Numuneler için aynı test şartlarını sonlu elemanlar modeli oluşturarak da uygulamış ve elde edilen sonuçları kıyaslamıştır (Çiçek, 2019 :33)

Karabıyık ve Apak, eriyik biriktirme yöntemi kullanarak PLA malzemenin ürettikleri test numunelerinin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmadaki numuneleri üç farklı dolgu şekli, üç farklı yazdırma hızı, üç farklı doluluk oranı belirleyerek gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numuneleri sertlik ölçme ve çekme deneylerine tabi tutmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre dolgu oranı arttıkça çekme mukavemeti artmış, dolgu deseni ve üretim hızının değişimi çekme mukavemeti açısından önemli bir değişim sağlamamıştır. Dolgu oranının artışı ve üretim hızının azalması ise uzama değerlerinde azalmaya, sertlik değerinde artışa sebep olmuştur. Dolgu deseninin farklılığının ise anlamlı bir değişime sebep olmadığı görülmüştür (Karabıyık ve Apak, 2021: 62-68)

Eriyik biriktirme tekniği kullanılarak üretilen termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerinin incelendiği ve proses parametrelerinin mekanik özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir diğer alışma Sezer ve arkadaşları tarafından ABS malzemeye karbon elyaf ekleyerek yapılmıştır. Yapılan alışma sonucunda karbon elyaf katkısı sayesinde parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirilebilmesine karşın esneklik ve işlenebilirliğinin azaldığı bulguları not edilmiştir. Çalışmada parçaları yazdırma deseninin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Sezer vd., 2019: 663-674).

Eklemeli imalat yönteminde termoplastik malzeme kullanılarak üretilen numunelere çeşitli mekanik testler uygulayarak malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmeye çalışıldığı veya üretim yöntem ve şeklinin ürünün mekanik özelliklerine etkisinin değerlendirilmeye çalışıldığı araştırmalar hızlı prototipleme teknolojisinin kullanılmaya başlamasından günümüze kadar artarak devam etmektedir. Dolayısıyla bu alanda yapılan birçok çalışma mevcuttur fakat çalışmamda olduğu gibi aynı şartlar altında üretilen aynı dolgu yoğunluğu, dolgu geometrisinde olarak sadece dolgu açısının değerştirildiği ve bu değerşimin ürünün mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin çekme, basma ve üç nokta eğme testleriyle tespit edilmeye çalışıldığı bir araştırmaya çok sık rastlanmamaktadır.

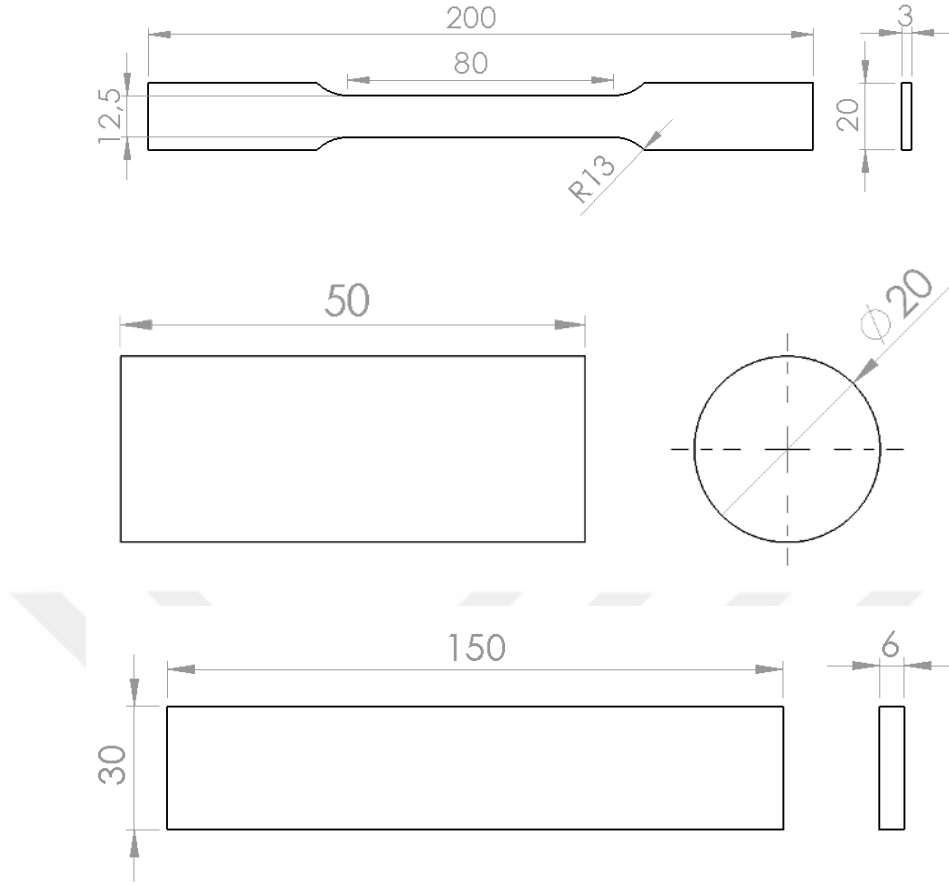
4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Bu çalışmada FDM yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcı ile PLA ve ABS termoplastik malzemelerinden farklı dolgu açıları ile üretilen test numunelerinin mekanik yükler altında incelenmesi sonucu çıkacak veriler değerlendirilecektir.

Önceki bölümde anlatılan veriler ışığında üretilen numunelerin alt, üst ve yan katmanlardan oluşan kabuk bölümü dışında kalan iç dolgu bölümünün katman örgüsündeki doku açısı değiştirilerek üretilmiştir. Çekme, basma ve üç nokta eğme deneylerine tabi tutulacak olan numunelerde 0°, 15°, 30°, 45° lik 4 farklı doku açıları ile çalışılmıştır. Her malzeme tipinden farklı dolgu açılara sahip 3'er numune üretilerek toplamda PLA malzeme için toplam 12 çekme, 12 basma ve 12 üç nokta eğme deney numunesi üretilmiş olup ABS malzeme için de aynı şekilde üç farklı test numuneleri için toplamda 36 numune üretilmiştir. Bu çalışmada iki farklı malzeme tipinden toplamda 72 numuneye uygulanan test sonuçlarına göre doku açısı ve malzeme tipi farklılıklarının malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

4.1. Numune Üretimi

Çekme, basma ve üç nokta eğme testlerinde kullanılacak numunelerin üretimi için öncelikle Solidworks programında katı modellemesi yapılmıştır. Numuneler ASTM E8-M standartlarına uygun olarak modellenmiştir. Sırasıyla çekme, basma ve üç nokta eğme deney numunelerine ait teknik resimler Şekil 4.1.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sırasıyla çekme, basma ve üç nokta eğme test numuneleri teknik resimleri

Tasarlanan numune modellemeleri Ultimaker Cura dilimleme programı kullanılarak proses parametrelerin belirlenmiş ve baskıya hazırlanmıştır. Test numuneleri 220x200x250 mm ebatlarında baskı yapabilen $\pm 0,1$ mm hassasiyete sahip Ender 3 Pro marka üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir.

PLA malzeme kullanılarak üretilen numunelerde gümüş gri renkli ABG marka 1,75 mm çapındaki $\pm 0,01$ mm hassasiyet, $\pm 0,01$ mm eksen daireselliği olan 190-220 °C aralığında baskı sıcaklığı gerektiren ve 0-80 °C aralığında tabla sıcaklığı gerektiren polimer esaslı termoplastik filament ve ABS malzeme kullanılarak üretilen numunelerde siyah renkli ABG marka 1,75 mm çapındaki $\pm 0,01$ mm hassasiyet, $\pm 0,02$ mm eksen daireselliği olan 220-240 °C aralığında baskı sıcaklığı gerektiren ve 80-100 °C aralığında tabla sıcaklığı gerektiren Şekil 4.2.'deki termoplastik filamentler kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Sırasıyla PLA ve ABS malzemeden üretilen filamentler

Eritilen termoplastiğin tablaya aktarıldığı uçta akışkanın yönünü veya özelliklerini kontrol etmek için nozul adı verilen parçalar kullanılmaktadır. Eriyik biriktirme tekniği ile çalışan üç boyutlu yazıcılarda katman kalınlığını belirleyen bu nozullar genellikle değişken kesit alanına sahip bir boru veya tüptür. Üretilecek ürünün ve baskı yapılacak yazıcının özelliklerine göre ölçüleri değişmektedir. Bu çalışmada tüm numuneler üretilirken 0,4 mm çapa sahip bakır nozul kullanılmıştır.

Eriyik biriktirme yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcılarda üretim yapılırken kullanılan dilimleme programında üretim şeklini, süresini ve ürünün özelliklerini değiştirebilecek birçok parametre mevcuttur. Bunlardan en önemlilerinden birisi katman yüksekliğidir. Bu parametre üretilen ürünün yatay düzlemdeki her bir katmanının yüksekliğini belirlemektedir. Bu sebepten FDM yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcılarda katman yüksekliği doğrudan ürünün yüzey kalitesini etkilemektedir. Katman yüksekliği üç boyutlu yazıcının marka, modeline ve kapasitesine göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan üç boyutlu yazıcının katman yüksekliği parametreleri 0,12 mm ile 0,28 mm aralığındadır. Standart olarak 0,2 mm kullanılmaktadır. Çalışmamızda kullanılacak test numunelerinin katman yükseklikleri PLA malzemeden üretilen numuneler için 0,2 mm, ABS malzemeden üretilen numunelerde çarpılmalar, katmanlar arası yapışmama ve boşluklar oluşması sorunlarının önüne geçebilmek adına 0,12 mm katman yüksekliği tercih edilmiştir.

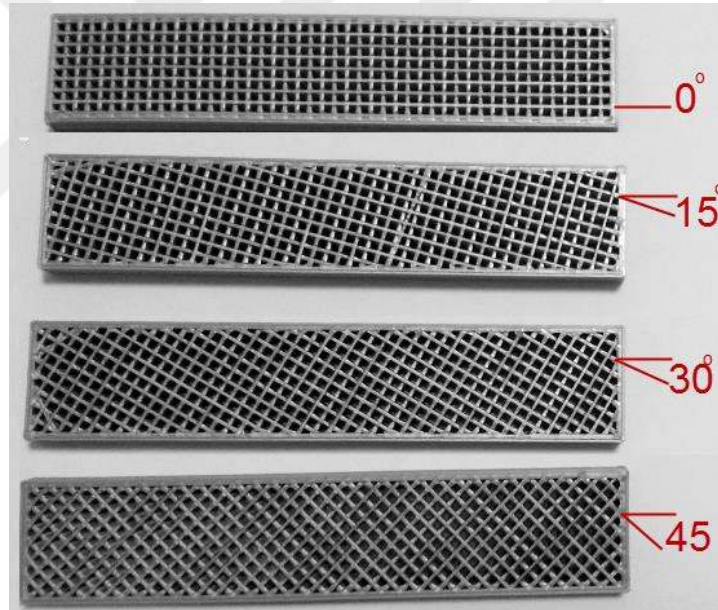
Bu çalışmada PLA malzemeden 0,2 mm katman kalınlığı ile üretilen test numuneleri numune yüksekliğine göre farklı katman sayılarından oluşmuştur. Numunenin baskı tablasındaki konumuna göre bu katmanların ilk 4 katmanı alt katman, son 4 katmanı ise üst katman ve yan duvarları da 4 katman olarak üretilmiştir. Bu kabuk bölümünün içerisinde kalan hacim ise belirlenen dolgu oranı, dolgu şekli ve yönü doğrultusunda doldurularak üretilmiştir.

ABS malzemeden üretilen numunelerde ise 0,12 mm katman kalınlığı belirlendiğinden dolayı numunelerin baskı tablasındaki konumlarına göre ilk 7 katman alt katman, son 7 katman

üst katman ve yan dış yüzeylerde 7 katman olarak üretilmiştir. Bu katmanların oluşturduğu kabuk bölümünün içerisinde kalan hacimde belirlenen dolgu parametrelerine göre üretilmiştir.

Dolgu kısmı ile ilgili ana parametreler dolgu oranı, dolgu geometrisidir. Kullanılan dilimleme programına göre değişmek ile beraber genellikle dolgu oranı standart olarak %20 belirlenmesine rağmen %1 ile %100 aralığında değiştirilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan iki farklı malzemenin tüm numuneleri %50 doluluk oranı ile üretilmiştir.

Dolgu şekli olarak programın sağladığı farklı dolgu geometri tipleri arasından ızgara (grid) tipi dolgu seçilerek tüm numuneler aynı dolgu tipi ile üretilmiştir. Aynı geometri ve dolgu oranında üretilen numuneleri dolgu modeli oluşturulurken kullanılan ızgaraların açıları 0° , 15° , 30° ve 45° olarak değiştirilmiş ve bu açı farklılıklarından oluşacak iç yapı değişikliğinin modelin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Izgara dolgu tipinde üretilen numunelerin iç yapısındaki açısal farklılıklarının gösterilmesi için üretilen kesit numunelere ait görsel Şekil 4.3.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. 0° , 15° , 30° ve 45° lik doku açılarının gösterimi

Üretilen modelin dilimleme programında belirlenecek bir diğer parametre ise baskı sıcaklığıdır. Eriyik biriktirme yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcının ekstruder bölümünde eritilecek olan filamentin nozul çıkış sıcaklığı ve baskının yapılacağı bölge olan tablanın sıcaklığı belirlenmektedir. Bu sıcaklıklar kullanılan malzeme cinsine ve markasına göre değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan PLA malzeme için standart nozul çıkış sıcaklığı 200°C ve tabla sıcaklığı 60°C dir. Bu çalışmada kullanılan ABS malzeme için standart nozul çıkış sıcaklığı 230°C ve tabla sıcaklığı 80°C dir. ABS Malzeme kullanılarak üretilen numuneler

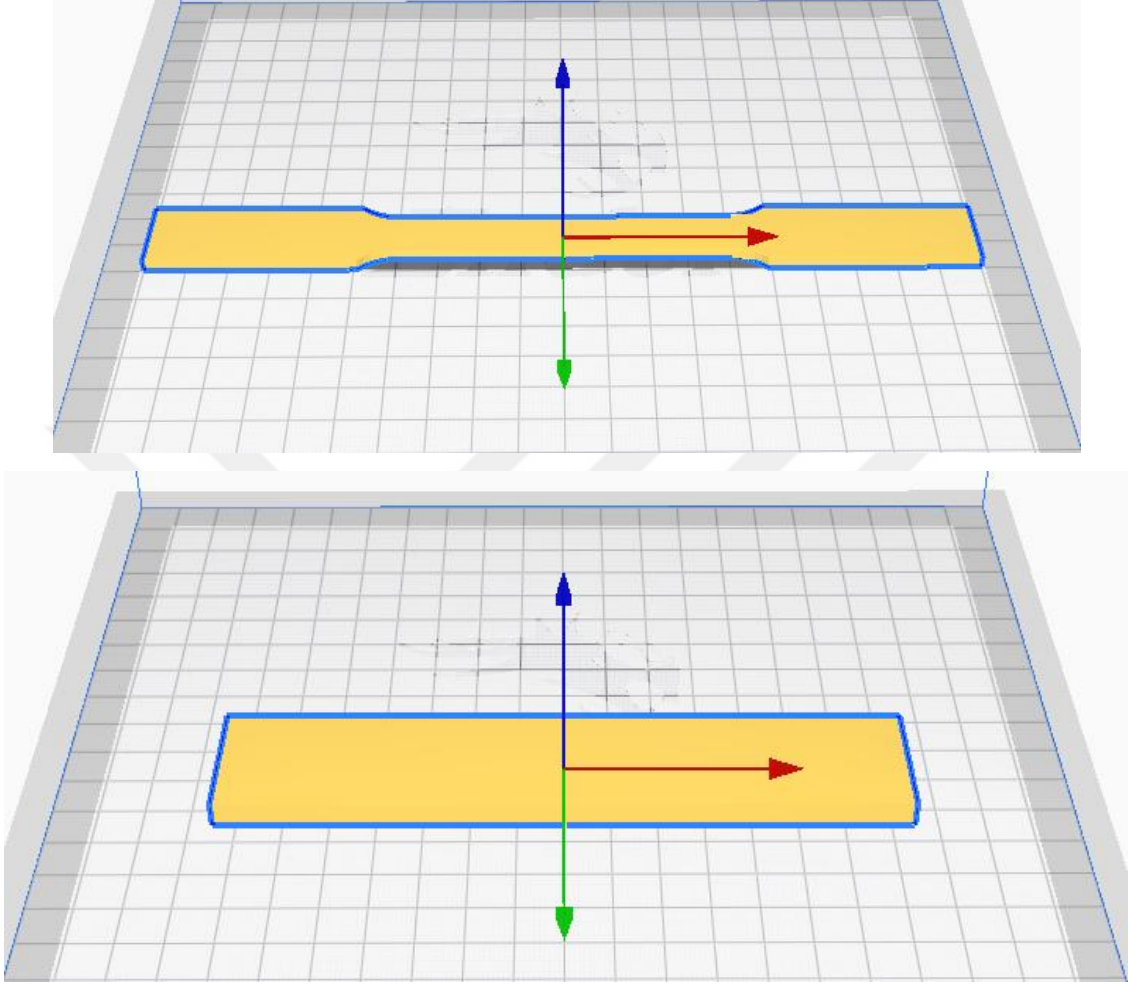
için ise nozul çıkış sıcaklığı 235 °C ve tabla yüzey sıcaklığı 80 °C olarak belirlenmiştir. Test numuneleri üretim sürecinde kullanılan dilimleme programında ayarlanan üretim parametreleri Tablo 4.1.' de verilmiştir.

Tablo 4.1. PLA ve ABS malzemedan üretilen test numunelerinin üretim parametreleri

PLA malzeme ile üretilen test numunelerinin üretim parametreleri	
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Alt-Üst Katman ve Duvar Kalınlığı	0,8 mm
Nozul çapı	0,4 mm
Dolgu Yoğunluğu	50%
Dolgu Geometrisi	Izgara
Dolgu Hattı Yönleri	0°- 15°- 30°- 45°
Yazdırma Sıcaklığı	200 °C
Yapı Levhası Sıcaklığı	60 °C
Yazdırma Hızı	25 mm/s
ABS malzeme ile üretilen test numunelerinin üretim parametreleri	
Katman Yüksekliği	0,12 mm
Alt-Üst Katman ve Duvar Kalınlığı	0,84 mm
Nozul çapı	0,4 mm
Dolgu Yoğunluğu	50%
Dolgu Geometrisi	Izgara
Dolgu Hattı Yönleri	0°- 15°- 30°- 45°
Yazdırma Sıcaklığı	235 °C
Yapı Levhası Sıcaklığı	80 °C
Yazdırma Hızı	25 mm/s

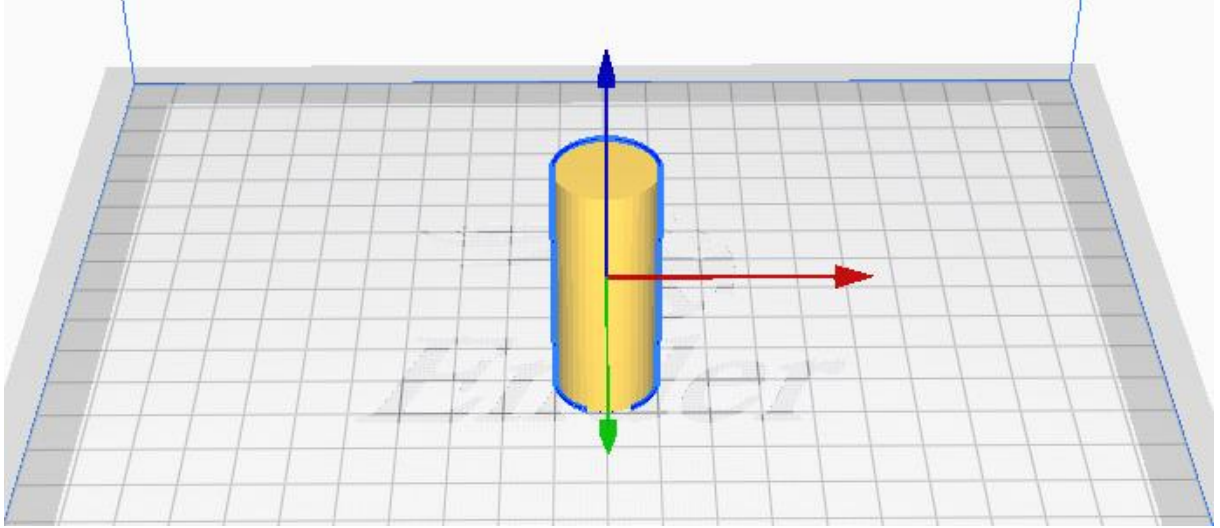
Üretilen tüm numuneler için baskı hızı, dilimleme programının standart olarak belirlediği değerler alınmıştır. ABS malzemenin tablaya yapışma sorununu engellemek ve numunelerin köşelerindeki çarpılmaları önlemek adına baskı esnasında yazdırma soğutma fanı devre dışı bırakılmıştır. ABS malzemedan üretilen numunelerde tablaya yapışmama ve çarpılma sorunlarının önüne geçebilmek adına tüm numuneler yapı levhası yapıştırma özelliğiyle radye (sal) kullanılarak üretilmiştir. PLA malzemedan üretilen numunelerde tablaya yapışmama sorunu yaşanmadığından soğutma fanı aktif olarak üretilmiştir. Tüm numune geometrileri destek yapısına ihtiyaç duymadan üretilebilecek geometriye sahip olduğundan destek yapısı kullanılmamıştır.

Belirtilen üretim parametreleri kullanılarak üretilen çekme ve üç nokta eğme deneyi numunelerinin tamamı Şekil 4.4.' de gösterildiği gibi üç boyutlu yazıcı üretim tablasına yatay olarak konumlandırılarak üretilmiştir.



Şekil 4.4. Sırasıyla çekme testi numunesi ve üç nokta eğme testi numunesinin üretim tablasındaki konumu

Basma deneyi numuneleri ise silindirik yapısı gereği üretim tablasına Şekil 4.5.' te gösterildiği üzere dik olarak konumlandırılarak üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. Basma testi numunesinin üretim tablasındaki konumu

4.2. Mekanik Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Önceki bölümlerde değinilen tasarım, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve üretim aşamalarının ardından tüm numunelere planlanan testlerin uygulanması aşamasına geçilmiştir.

4.2.1. Çekme Deneyi

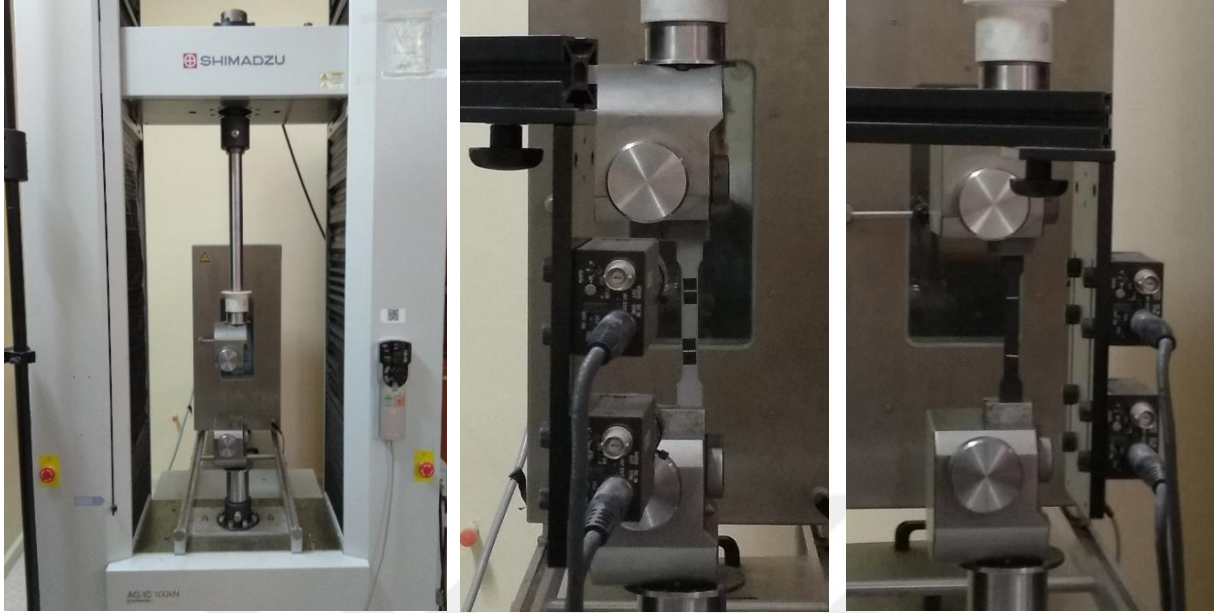
Öncelikle üretilen numuneler içerdiği 4 farklı doku açısına ve malzeme tipine göre sınıflandırılmış ve sırasıyla çekme deneyine tabi tutulmuştur. PLA ve ABS malzemeden üretilen çekme deney numuneleri Şekil 4.6.' da sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.6. PLA (sol) ve ABS (sağ) malzemeden üretilen çekme test numuneleri

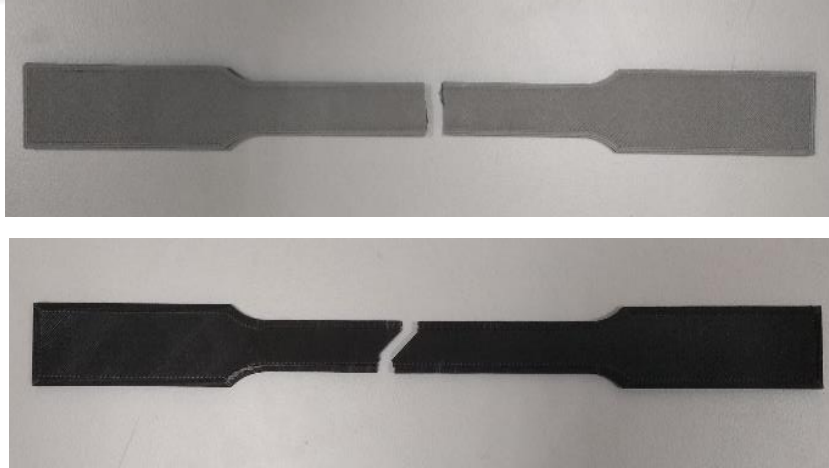
Bir sonraki adım olarak üretilen çekme deney numuneleri Shimadzu marka AG-IC model 100 kN kapasiteli çekme deney cihazında 10 mm/dk hızda tek eksenli çekme deneyine

tabi tutulmuştur. Deney sırasında temassız ekstansometre kullanılmıştır. Kullanılan deney sistemi Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.

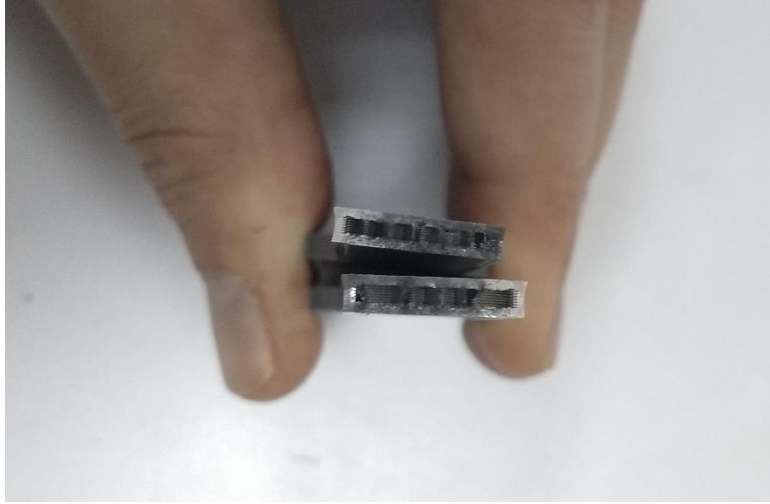


Şekil 4.7. PLA ve ABS malzemelerinin çekme test sırasında görüntüleri

Numunelerde kopma gerçekleşene kadar deneyler tekrar edilmiş ve kuvvet-deplasman verileri bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Çekme testi sonrasında hasara uğramış örnek bir numune Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.' de verilmiştir.

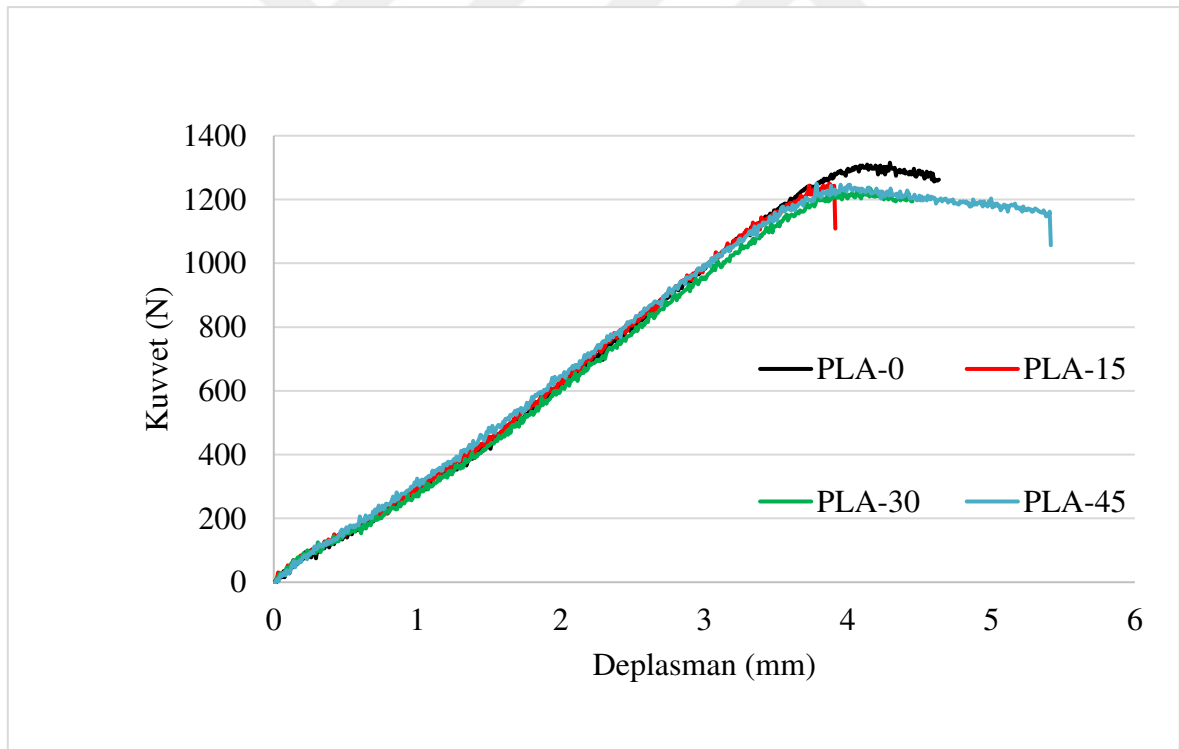


Şekil 4.8. PLA (üst) ve ABS (alt) test numunelerin çekme deneyi sonrası örnek numune görseli

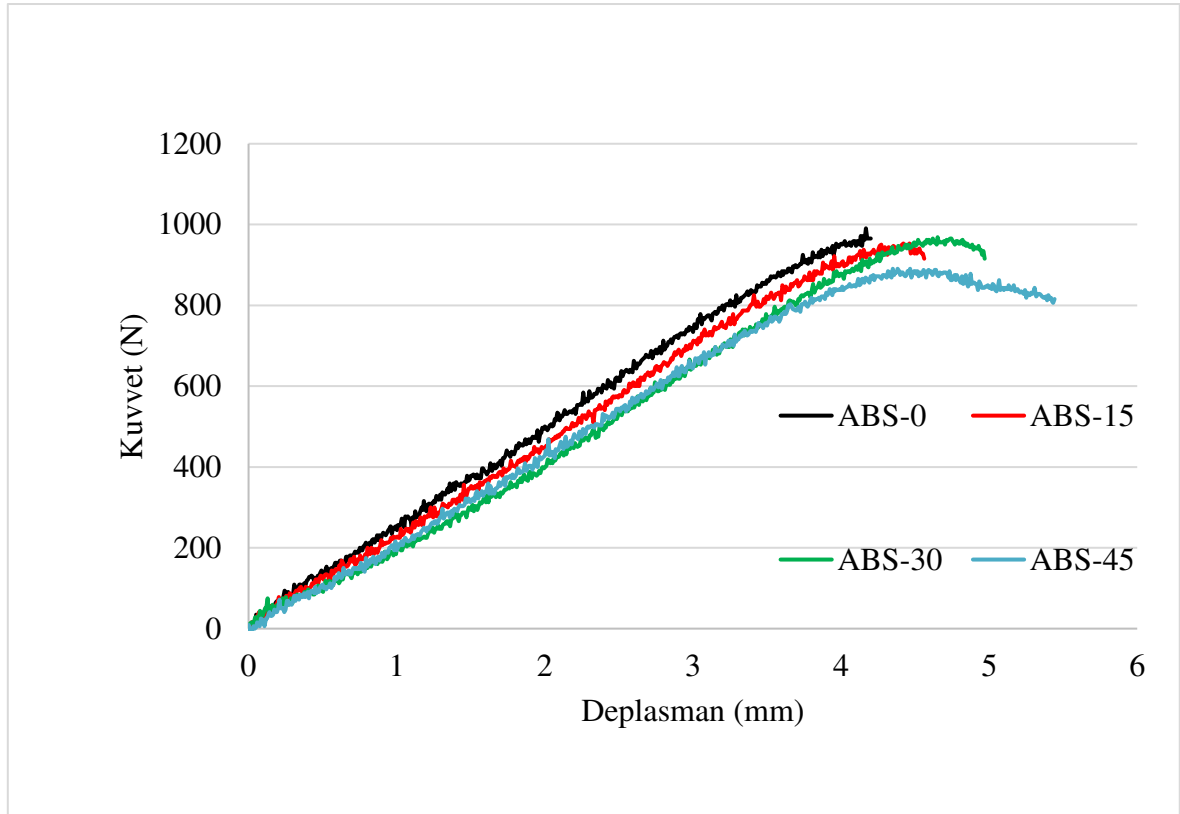


Şekil 4.9. PLA malzemeden üretilen çekme deney numunesinin test sonrası kesit görüntüsü

Çekme testleri PLA ve ABS malzemeler için 4 farklı doku açısında üçer tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve çalışma kapsamında toplam 24 adet tek eksenli çekme testi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlere dair elde edilen eğriler PLA ve ABS malzemeler için sırası ile Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.' de verilmiştir.



Şekil 4.10. PLA malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri

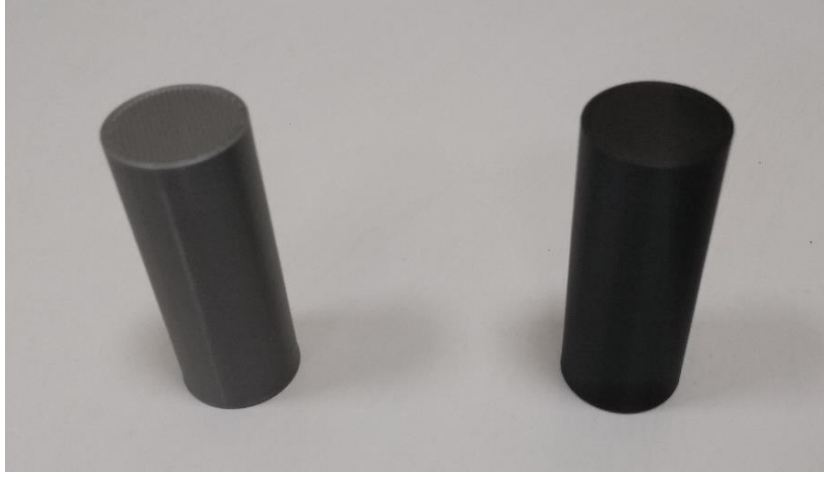


Şekil 4.11. ABS malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri

Kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde PLA malzeme beklenildiği üzere ABS malzemeden daha yüksek kuvvet davranışı sergilemiştir. Her iki malzemenin de farklı doku açılarına göre davranışları incelendiğinde doku açısı arttıkça ABS malzemenin kuvvet değerlerinin bir miktar azaldığı, PLA malzemedede ise kuvvet açısından belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Özetle doku açısının kuvvet özelinde her iki malzemede de belirgin bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Uzama tarafından bakıldığında ise PLA malzemesinin 15° lik doku açısında 0° ye göre kısalma oluşurken, 30° lik numune 0° ye benzer ve 45° lik doku açısında ise 0° den belirgin bir şekilde uzama gözlemlenmiştir. ABS malzemesinde ise doku açısı arttıkça uzama miktarlarında da artış gözlemlenmiştir. En bariz artışın 45°'lik doku açısında meydana geldiği tespit edilmiştir. Özetle 45° lik doku açısı her iki malzeme açısından da kritik değer olarak öne çıkmış ve her iki malzemede de kuvvet değerlerinde azalma sergilerken uzama değerlerinde ise bariz bir artışa neden olmuştur.

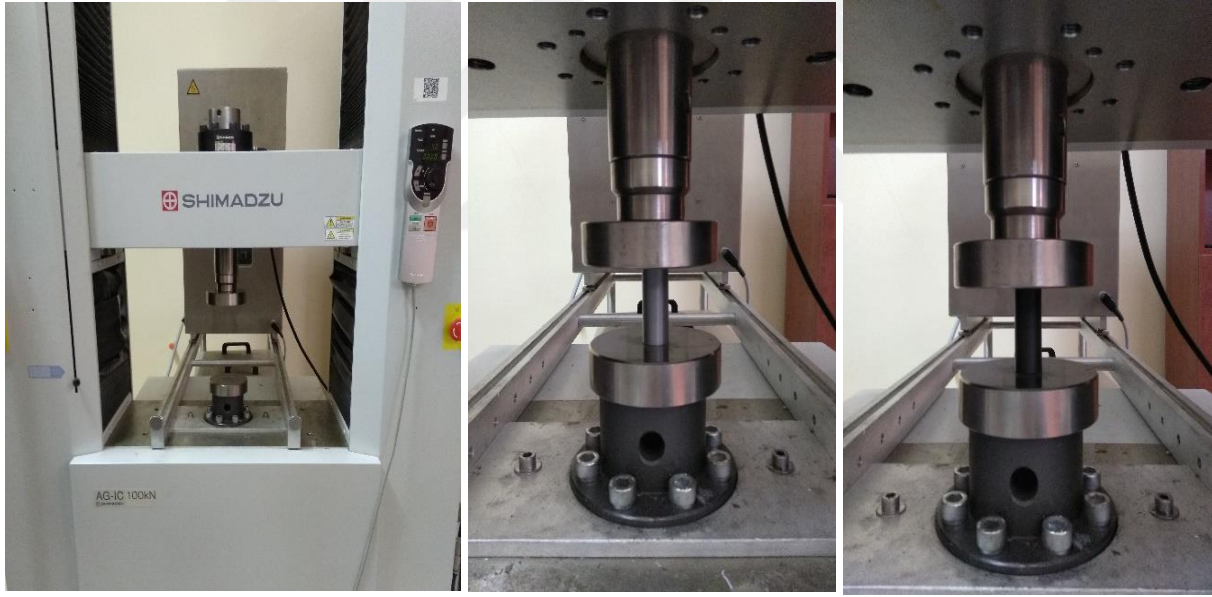
4.2.2. Basma Deneyi

PLA ve ABS malzemelerinden üretilen numuneler basma testine tabi tutulmuştur. Üretilen basma deney numuneleri Şekil 4.12.' de gösterilmiştir.



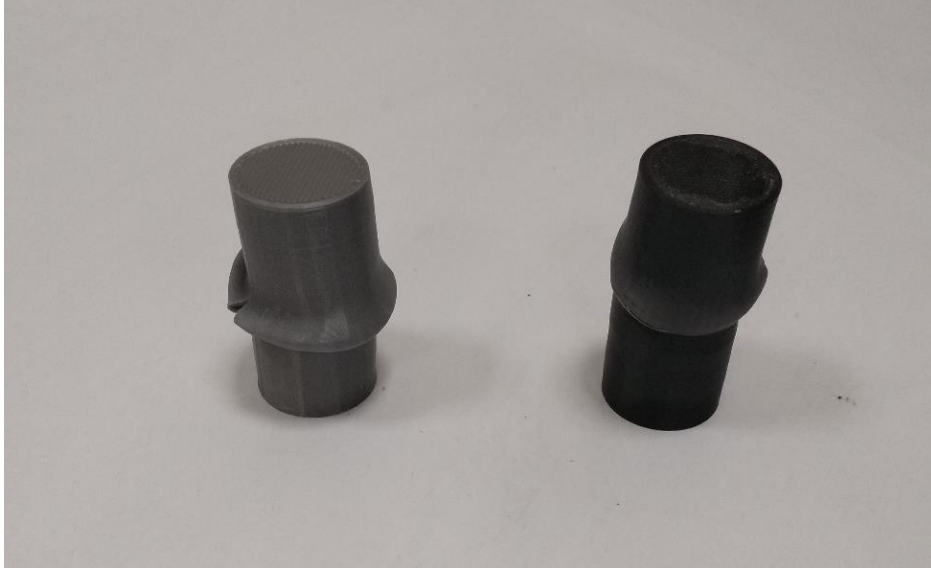
Şekil 4.12. PLA (sol) ve ABS (sağ) malzemeden üretilen basma test numuneleri

Sonrasında üretilen basma deney numuneleri Shimadzu marka AG-IC model 100 kN kapasiteli basma deney sisteminde 10 mm/dk hızda basma deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan deney sistemi Şekil 4.13.'de gösterilmiştir.



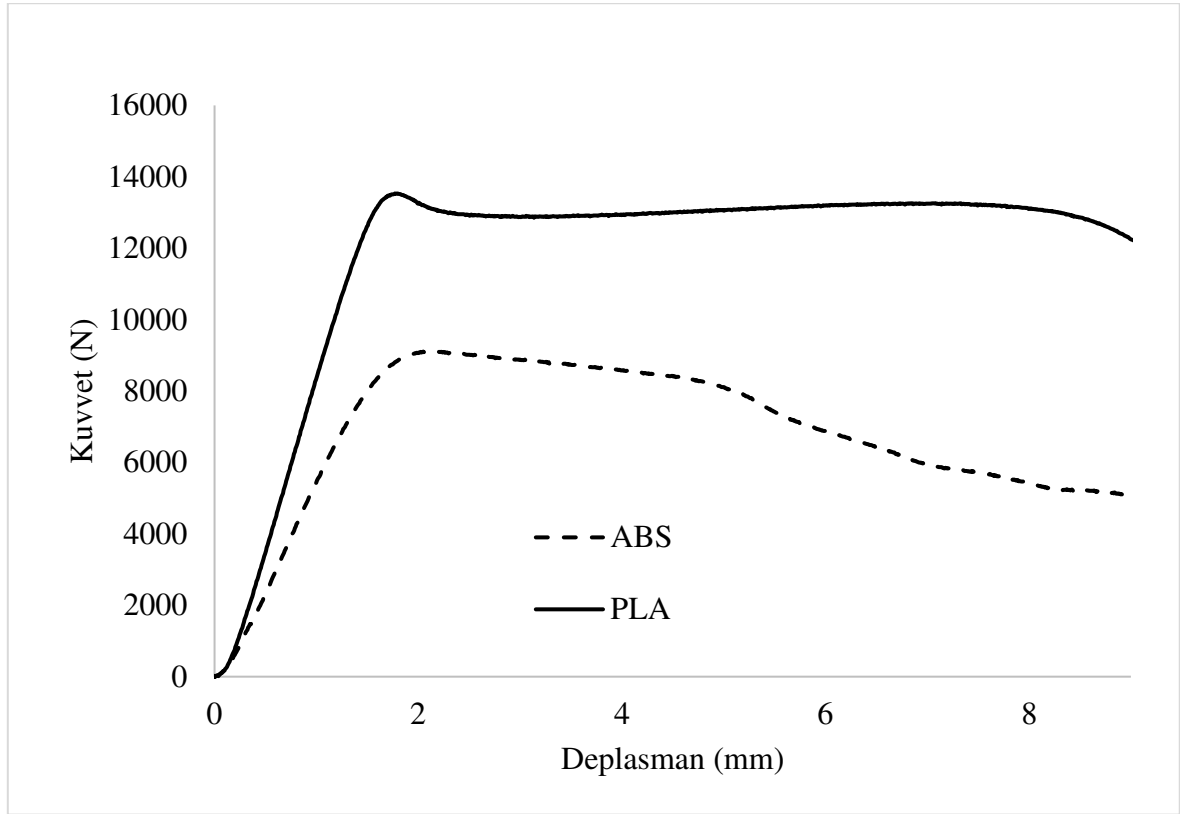
Şekil 4.13. PLA ve ABS malzemelerinin basma testi sırasında görüntüleri

Numunelerde deformasyon gerçekleşene kadar deneylere devam edilmiş ve kuvvet-deplasman verileri bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Basma testi sonrasında hasara uğramış örnek bir numune Şekil 4.14.'de verilmiştir.



Şekil 4.14. PLA (sol) ve ABS (sağ) test numunelerin basma deneyi sonrası örnek numune görseli

Beklendiği üzere basma testi numune geometrisinin dairesel oluşundan dolayı doku açılarının değiştirilmesinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu sebepten dolayı basma testinde PLA ve ABS malzemeler için her malzeme tipinden 3'er adet numuneye basma testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlere dair elde edilen PLA ve ABS malzemeler için kuvvet-deplasman eğrisi Şekil 4.15.' de verilmiştir.

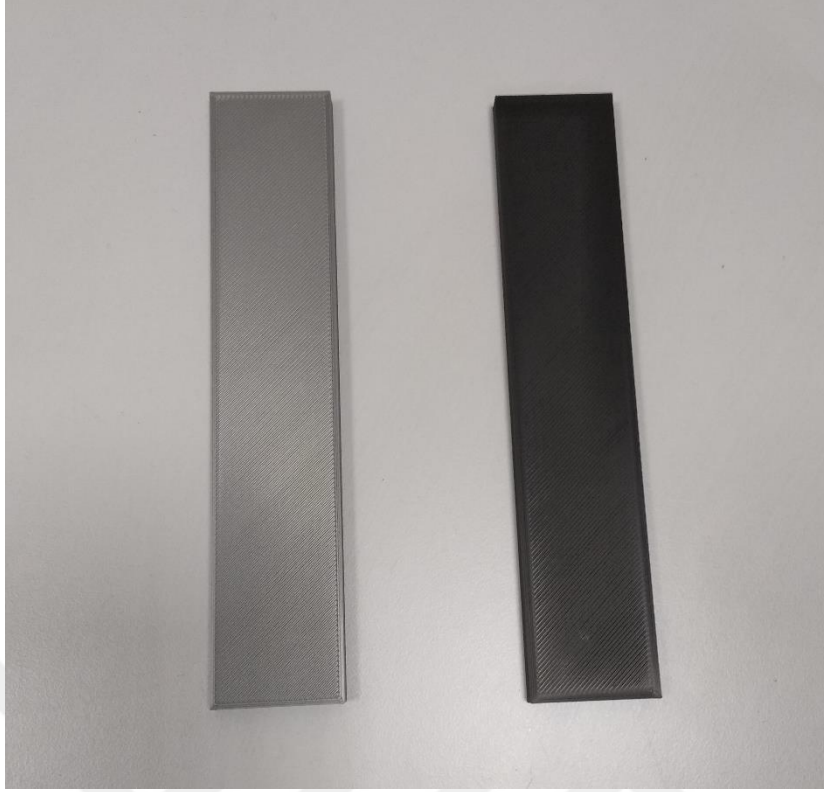


Şekil 4.15. ABS ve PLA malzemelerinden üretilen numunelere gerçekleştirilen basma testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrisi

Basma testi uygulanan PLA ve ABS malzemelerden yapılan numunelere ait kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde, PLA malzemedan yapılan numune ABS malzemedan imal edilen numuneye göre daha yüksek kuvvet davranışı sergilemiştir. Aynı malzeme tipinden farklı doku açılarındaki üretilen numunelerin basma testlerinde elde edilen verilerinde dikkat çekici bir farklılık gözlemlenmemiştir.

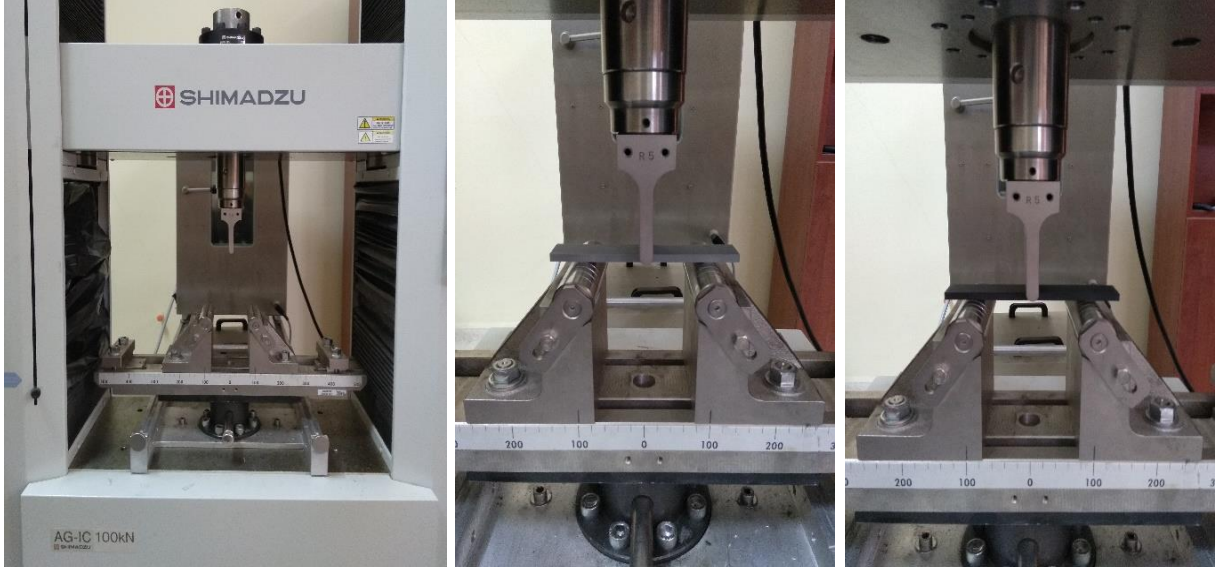
4.2.3. Üç Nokta Eğme Deneyi

Çalışma kapsamında üretilen numunelere uygulanacak son test olan üç nokta eğme testi için farklı malzemelerden ve farklı açılara sahip doku tiplerinden üretilen numuneler sınıflandırılarak sırasıyla üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Üretilen üç nokta eğme testi numuneleri sırasıyla Şekil 4.16.'da verilmiştir.



Şekil 4.16. PLA (sol) ve ABS (sağ) malzemelerinden üretilen üç nokta eğme numuneleri

Üretilen üç nokta eğme deneyi numuneleri Shimadzu marka AG-IC model 100 kN kapasiteli üç nokta eğme deney sisteminde 10 mm/dk hızda eğme deneyine tabi tutulmuştur. Kullanılan deney sistemi Şekil 4.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. PLA ve ABS malzemelerinin üç nokta eğme testi sırasında görüntüleri

Numunelerde deformasyon gerçekleşene kadar deneylere devam edilmiş ve kuvvet-deplasman verileri bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Üç nokta eğme testi sonrasında hasara uğramış örnek bir numune Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.’ de verilmiştir.

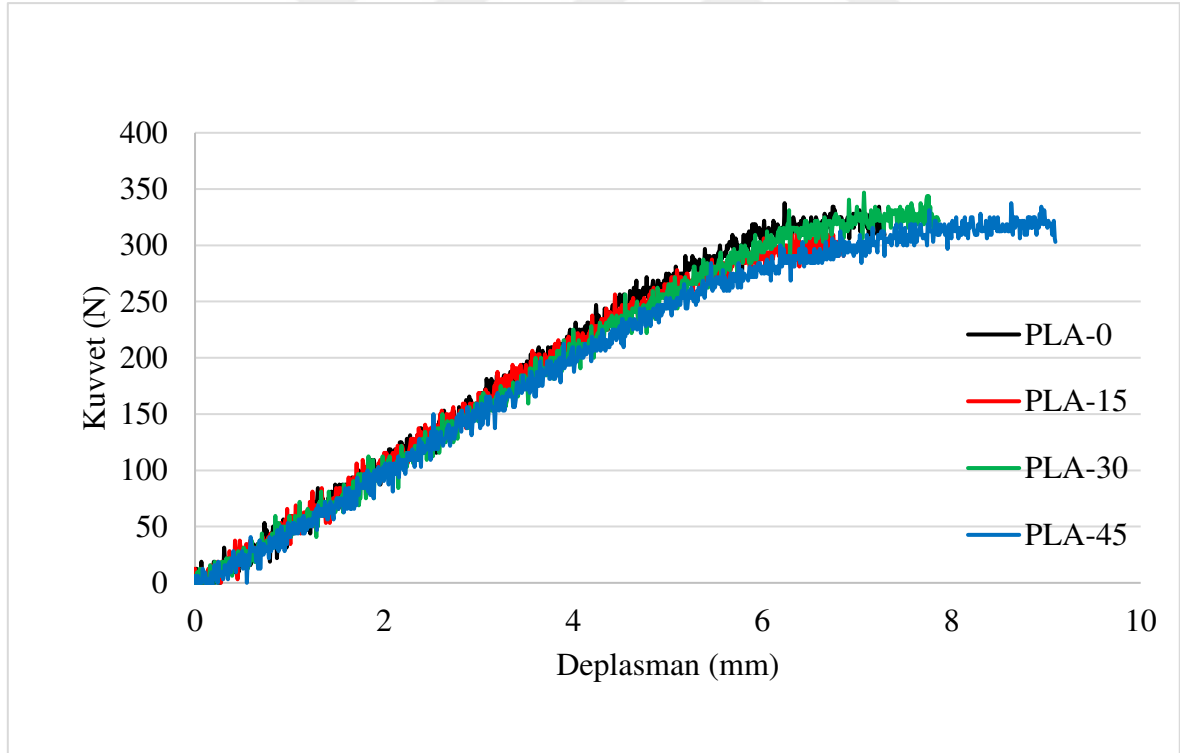


Şekil 4.18. PLA (üst) ve ABS (alt) test numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası örnek numune görseli

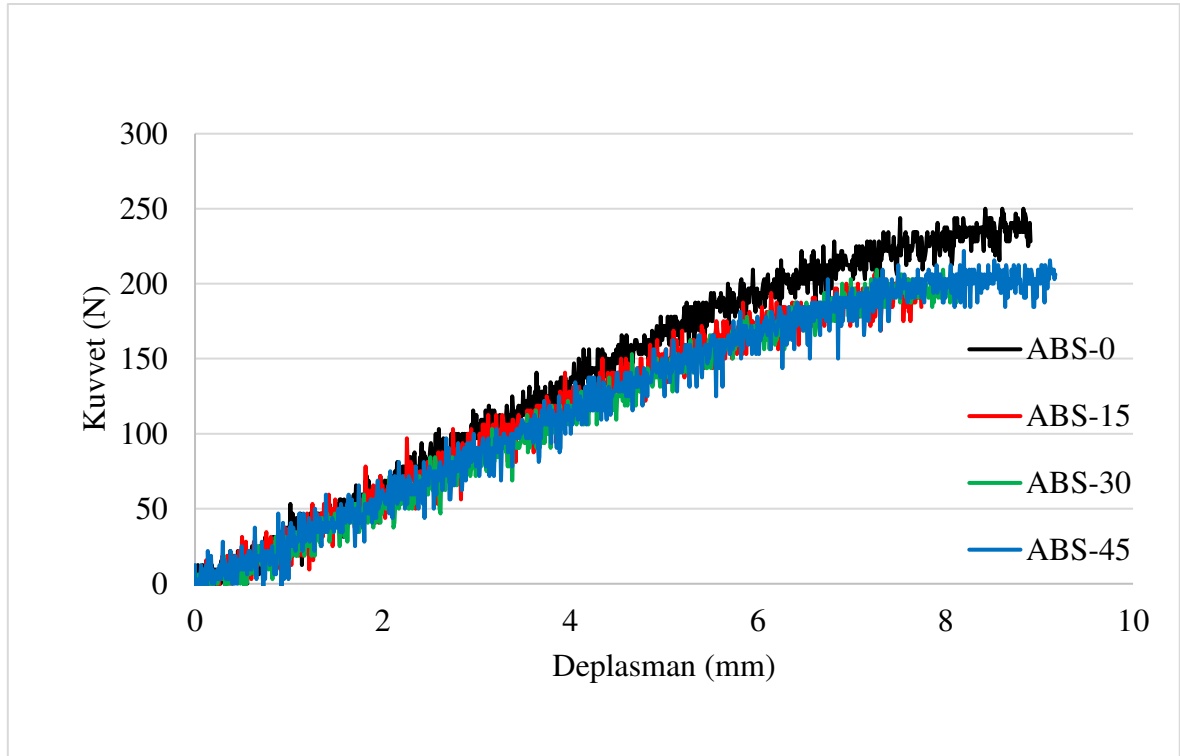


Şekil 4.19. ABS malzemeden üretilen üç nokta eğme numunesinin test sonrası kırılan kesit görüntüsü

Üç nokta eğme testleri PLA ve ABS malzemeler için 4 farklı doku açısında üçer tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve çalışma kapsamında toplam 24 adet üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testlere dair elde edilen eğriler PLA ve ABS malzemeler için sırası ile Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.' de verilmiştir.



Şekil 4.20. PLA malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri



Şekil 4.21. ABS malzemesi için farklı doku açılarında numunelere gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrileri

Kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde PLA malzeme beklenildiği üzere ABS malzemedan daha yüksek kuvvet davranışı sergilemiştir. Her iki malzemenin de farklı doku açılarına göre davranışları incelendiğinde doku açısı arttıkça ABS malzemenin kuvvet değerlerinin bir miktar azaldığı görülmüştür. Farklı doku açılarında PLA malzemede kuvvet açısından belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Özetle doku açısının kuvvet özelinde her iki malzemede de belirgin bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Uzama tarafından bakıldığında ise PLA malzemesinin 15° lik doku açısında 0° ye göre kısalma oluşurken, 30° lik numune 0° den daha fazla uzamış olup ve 45°'lik doku açısında ise 30°' ye göre belirgin bir şekilde daha fazla uzama gözlemlenmiştir. Uzama miktarlarını sıralanacak olursa en fazla uzayandan aza doğru 45°, 30°, 0°, 15° olarak sıralanabilir. ABS malzemesinde ise 0° ile 45° lik doku açılarında sahip numuneler birbirine benzer uzama gösterirken, 15° ile 30° lik doku açılarında sahip numunelerde birbirine benzer uzama değerleri görülmüştür. 15° ve 30° lik numunelerde diğerlerine göre daha az uzama değeri gözlemlenmiştir. Bu verilere göre 45° lik doku açısı her iki tip malzeme açısından da kritik değer olarak öne çıkmış ve her iki malzemede de kuvvet değerlerinde azalma sergilerken uzama değerlerinde ise artışa neden olmuştur.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üç boyutlu yazıcı ile farklı malzemelerden farklı doku yapı tiplerinde üretilen numunelere mekanik testler uygulanarak farklı açılarda oluşturulan doku tiplerinin malzemenin mekanik davranışlarına etkisinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle üç boyutlu yazıcı ile üretilecek numunelerin malzemeleri tespit edilmiş ve eklemeli imalat yönteminde en çok tercih edilen PLA ve ABS malzemeler tercih edilmiştir. Bu malzemelerden üretilecek numunelere çekme, basma ve üç nokta eğme testlerinin uygulanması için standartlar doğrultusunda numune tasarımı yapılmıştır.

Tasarlanan numunelerin üç boyutlu yazıcıda üretilebilmesi için gerekli proses parametreleri belirlenmiştir. Numunelerin üretimi aşamasında belirlenecek birçok üretim parametresi içerisinde çalışmanın hedefi olan doku açısı farklılıklarının mekanik özelliklere etkisinin tespiti için çekme, basma ve üç nokta eğme testi numunelerindeki doku açısı 0°, 15°, 30° ve 45° olarak belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda numunelerin geometrik kodları oluşturulmuştur.

Oluşturulan geometrik kodlar üç boyutlu yazıcıya aktararak PLA malzemenin her tip test için 4 farklı doku açısına sahip ve her doku açısından 3'er adet olmak üzere toplamda 36 adet numune üretilmiştir. Aynı şekilde ABS malzemenin de her tip test için 4 farklı doku açısına sahip ve her doku açısından 3'er adet olmak üzere toplamda 36 adet numune üretilmiştir. Belirlenen proses parametrelerine sahip 72 adet numune aynı ortam koşullarında üretilerek mekanik testlerin uygulanma aşamasına kadar sınıflandırılarak aynı ortam koşullarında saklanmıştır.

Üretilen numuneler Shimadzu marka AG-IC model 100 kN kapasiteli test sisteminde sırasıyla çekme, basma ve üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur. Numuneler hasara uğrayana kadar testlere devam edilmiş ve elde edilen kuvvet-deplasman verileri kaydedilmiştir.

Çekme testi uygulanan numunelerde doku açısı arttıkça ABS malzemenin kuvvet değerinin azaldığı, PLA malzeme ise belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. ABS malzemesinde doku açısı arttıkça uzama miktarında da artış gözlemlenmiştir. PLA malzeme ise en az uzama 15° lik doku açısına sahip numunede görülürken en fazla uzama ise 45° lik doku açısına sahip numunede gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testlerinden elde edilen verilere göre doku açısı arttıkça ABS malzemenin kuvvet değerinin bir miktar azaldığı, PLA malzeme ise önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Uzama açısından bakıldığında ise PLA

malzemesinde en çok uzama görülen doku açısından en aza doğru 45°, 30°, 0°, 15° şeklinde sıralanabilir. ABS malzeme için ise birbirine benzer olmakla beraber 0° ve 45° lik numunelerde 15° ve 30° lik numunelere göre daha fazla uzama değeri gözlemlenmiştir.

Çekme ve üç nokta eğme testlerinden elde edilen verilerde doku açılarındaki farklılıkların malzemenin mekanik özelliklerine etkileri gözlemlenirken basma testi numunesinin silindirik geometrisinden dolayı doku açısındaki farklılıkların malzemenin mekanik özellikleri üzerinde dikkat çekici bir etkisi görülmemiştir. Bu sebepten dolayı basma testinde elde edilen verilerde doku açısındaki farklılıkların mekanik özelliklere etkisi incelenememiş olup ABS ve PLA malzemelerinden üretilen numunelerin testi verileri karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak PLA malzeme ABS malzemeye göre daha yüksek kuvvet davranışı sergilemiştir. Doku açılarındaki değişiklik yönünden ise 45° lik doku açısı ile üretilen numuneler iki malzeme türü için de kritik değer olarak öne çıkmış ve kuvvet değerinde azalmaya neden olurken uzama değerlerinde ise bariz bir artışa sebep olmuştur.

KAYNAKÇA

- 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.
- Akdoğan, M.** (2019). *Hızlı Prototipleme Yönteminde Proses Parametrelerinin Ürün Mekanik Özelliklerine Etkisinin Tespiti* (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Akdoğan, M. Y.** (2019). *Hızlı Prototipleme Yönteminde Proses Parametrelerinin Ürün Mekanik Özelliklerine Etkisinin Tespiti* (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Bartolomé, E., Bozzo, B., Sevilla, P., Martínez-Pasarell, O., Puig, T., & Granados, X.** (2017). ABS 3D printed solutions for cryogenic applications. *Cryogenics*, 82, 30-37.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K.** (2011). Gear-general. *Shigley's Mechanical Engineering Design*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.** (2013). *Materials Science and Engineering an Introduction*, 9th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C., & Duysak, A.** (2013). “*Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları*”, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, Sayı: 31 53-70.
- Çiçek, Ö.** (2019). *Eriyik Yığılma Modelleme İle Üretilen Abs Ve Pla Parçalarının Mekanik Özelliklerinin Değişken Dolgu Oranlarında Karakterizasyonu Ve Sayısal Modellemesi* (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019.
- Davis, J. R.** (2004). *Tensile Testing*, 2nd edition, ASM International, Materials Park, OH.
- Dieter, G. E., Kuhn, H. A., & Semiatin, S. L.** (2003). *Handbook of workability and process design*, ASM international, 86.
- Dowling, N. E.** (2007). *Mechanical Behavior of Materials*, 3rd edition, Prentice Hall (Pearson Education), Upper Saddle River, NJ.
- Durgun, I., & Ertan, R.** (2014). Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 228–235.

Erdem, E., & Morgil, F.İ. (2002). Lise Öğrencilerinin Temel Polimer Bilgileri Üzerine Bir Çalışma, *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 23(23), s.88-94.

Evlen H., Özdemir M. A., & Çalışkan A. (2019). “Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1031-1037.

Hosford, W. F. (2005). *Mechanical Behavior of Materials*, Cambridge University Press, New York.

Kara, N. (2013).“Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı”, *Mühendis ve Makina*, 54(636), s.70-75.

Karabıyık, Ö., & Apak, K. (2021) *Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemesinden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 13(2), 62-68.

Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G. A. O., & Zimmer, D. (2016). Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP*, 43, 286–291.

Maso, A. D., & Cosmi, F. (2018). Mechanical Characterization Of 3D-Printed Objects, *Materials Today: Proceedings 5*, 26739–26746.

Morgül, Ö. K. (2015). Mühendislikte DeneySEL Metotlar Ders Notu, 3 Nokta Eğme Deneyi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Özbey, A. (2020). *Fiziksel Modelleme ve Hızlı Prototip Yapımının Ürün Kimliği Gelişimine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haliç Üniversitesi.

Özdoğan, S. (2021). *Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilen Parçaların Baskı Parametrelerinin Üç-Nokta-Eğilme Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Necmettin Erbakan Üniversitesi.

Savaşkan, T. (2021). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul.

Sculpteo (2019). *The State of 3D Printing*. [Erişim tarihi 27.09.2022, <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2019/>]

Sculpteo (2021). *The State of 3D Printing*. [Erişim tarihi 27.09.2022, <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>]

Sezer, H. K. , Eren, O. , Börklü, H. R. & Özdemir, V. (2019). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: Fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (2) , 663-674 .

Shubham, P., Sikidar, A., & Chand, T. (2016). The influence of layer thickness on mechanical properties of the 3D printed ABS polymer by fused deposition modeling. *Key Engineering Materials*, 706, 63–67.

Sönmez, E. (2015). *Metal Şekillendirme İşleminde Geri Esneme Tahmininin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.

Taormina, G., Sciancalepore, C., Bondioli, F., & Messori, M. (2018). Special Resins for Stereolithography: In Situ Generation of Silver Nanoparticles. *Polymers*, 10(2), 212. 28.

Wang, X., Zhao, L., Fuh, J. Y. H., & Lee, H. P. (2019). Effect of porosity on mechanical properties of 3D printed polymers: Experiments and micromechanical modeling based on X-ray computed tomography analysis. *Polymers*, 11(7), 1154.

Xu, F., Loh, H. T., & Wong, Y. S. (1999). Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems. *Rapid Prototyping Journal*, 5(2), 54–60.

Yapa, Y. L., Toha, W., Konerua R., Linb K., Yeohb K. M., Limb C. M., Leeb, J. S., Plempingb, N. A., Linb R., Ngb, T. Y., Chanc, K.I., Guangc, H., Chanc, W. Y. B., Teongc, S.S., & Zhengc, G. (2019). A Non-Destructive Experimental-Cum-Numerical Methodology For The Characterization Of 3D-Printed Materials-Polycarbonate-Acrylonitrile Butadiene Styrene (PC-ABS), *Mechanics of Materials* 132, 121–133.