

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİAMİD 66 FİLAMENT
KULLANILARAK FDM TİPİ YAZICILARDA ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bagdaulyet YERMURAT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Ortak Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Osman İYİBİLGİN

Temmuz 2024

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİAMİD 66 FİLAMENT
KULLANILARAK FDM TİPİ YAZICILARDA ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bagdaulyet YERMURAT

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 05/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Ahmet DEMİRER	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Vedat TAŞDEMİR	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Ömer SEÇGİN	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Osman İYİBİLGİN	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Bagdaulyet YERMURAT

05/07/2024

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde, maddi ve manevi çok emeği ve desteği olan aileme ve tez sürecinde destekleyen tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Lisansüstü eğitimim boyunca tersine mühendislik laboratuvarında çalışma imkanı sunan tez süreci boyunca moral ve teknik bilgilerini esirgemeyen tez danışmanım, sayın Doç. Dr. Ömer SEÇGİN hocama teşekkürlerimi sunarım. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden sayın Prof. Dr. Metin İPEK hocama ve Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden sayın Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL hocama, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden sayın Prof. Dr. Ahmet DEMİNER hocama ve ortak danışmanım Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden sayın Dr. Öğrt. Üyesi Osman İYİBİLGİN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi inşaat mühendisliği bölüm başkanı Prof. Dr. Ferhat AYDIN ve inşaat mühendisliği bölüm teknikeri Sami GÜRSES'e bölüm uhdesinde bulunan çekme cihazını kullanmamız noktasında verdikleri destek için ayrıca teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi BAP koordinatörlüğünün 130-2023 sayılı projesi ile destverilmiştir. Anılan kuruma ayrıca teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi	1
1.1.1. Eklemeli imalatın avantajları ve dezavantajları	3
1.1.2. Eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanları.....	4
1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri	5
1.2.1. Eriyik biriktirme modelleme	6
1.2.2. Seçici lazer sinterleme	8
1.2.3. Stereolitografi (SLA)	8
1.2.4. Lamine nesne imalatı (LOM).....	9
1.2.5. Polyjet modelleme (PJM).....	10
1.3. Poliamid 66	11
1.4. Karbon Elyaf	11
1.5. Literatür İncelemesi	12

BÖLÜM 2.

MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
2.1. Filament	17
2.2. Üç Boyutlu Yazıcı (3B Yazıcı)	18
2.3. Test Numunelerinin Üretilmesi.....	23

2.4. Ölçme ve Kontrol.....	28
2.5. Çekme Testi	28
2.6. Basma Testi.....	30
2.7. 3 Nokta Eğme Testi.....	33
2.8. İzod Darbe Testi.....	36
2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	37
2.10. Yüzey Pürüzlülüğü (Ra).....	38

BÖLÜM 3.

BULGULAR VE TARTIŞMA..... 40

3.1. Çekme Testi Bulguları	41
3.2. Basma Testi	52
3.3. 3 Nokta Eğme Testi.....	59
3.4. İzod Darbe Testi.....	66
3.5. Yüzey Pürüzlüğünün incelemesi.....	72
3.6. SEM Analizi.....	76

BÖLÜM 4.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84

KAYNAKLAR 85

KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
3DP	: Üç Boyutlu Baskı
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
STL	: Standart Triangle Language
FDM	: Eriyik Biriktirme Modelleme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SLA	: Stereolitografi
LOM	: Nesne Üretimi
PJM	: Polyjet Modelleme Yöntemi
PA	: Poliamid
PA66	: Poliamid 66
KE	: Karbon Elyaf

SİMGELER

σ_b	: Basma gerilmesi (MPa)
P_b	: Basma yükü (N)
A_b	: Numunenin kesit alanı
F	: Uygulanan kuvvet (N)
L	: Mesnetler arası mesafe (mm)
b	: Numunenin genişliği (mm)
h	: Numunenin kalınlığı (mm)
MPa	: Megapaskal

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1: Creator 3 3B yazıcı teknik özellikleri.	19
Tablo 2.2: Dış duvar sayısı ve kalınlıkları.	23
Tablo 2.3: Numune üretiminde kullanılan sabit veriler.	24
Tablo 2.4: Deney parametreleri ve seviyeleri.	24
Tablo 2.5: Deney tablosu.	26
Tablo 2.6: eBox Lite filament kurutucu cihazın özellikleri.	27
Tablo 2.7: eBox filament kurutma cihazın sıcaklık seviyeleri.	28
Tablo 3.1: PA66-20KE ham filamentin çekme testi sonuçları.	42
Tablo 3.2: PA66-20KE çekme test gerilme sonuçları.	45
Tablo 3.3: Çekme testi için varyans analizi tablosu.	47
Tablo 3.4: Çekme testi optimizasyonu sonrası elde edilen sonuçlar.	50
Tablo 3.5: PA66-20KE kompozit filamentin 10 günlük kütle farkı.	51
Tablo 3.6: Basma testi gerilme sonuçları.	55
Tablo 3.7: Basma testi için varyans analizi tablosu.	57
Tablo 3.8: En iyi parametre basma gerilmesi sonuçları.	58
Tablo 3.9: Üç nokta eğme testinde oluşan yük ve ortalama yük sonuçları.	62
Tablo 3.10: Üç nokta eğme testi için varyans analizi tablosu.	64
Tablo 3.11: Optimizasyon parametrelerden oluşan 3 nokta eğme numunelerin test sonuçları.	65
Tablo 3.12: İzod darbe deneyi sonuçları.	69
Tablo 3.13: İzod darbe testi için varyans analizi tablosu.	71
Tablo 3.14: PA66-20KE yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.	74
Tablo 3.15: Yüzey pürüzlülüğü testi için varyans analizi tablosu.	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: S.scott Crump tarafından sunulan orijinal FDM aparatı çizimi.....	2
Şekil 1.2: Eklemeli imalat teknolojisi üretim adımları.	3
Şekil 1.3: Eklemeli imalat teknolojisinin ASTM standartlarına göre sınıflandırılması.	5
Şekil 1.4: FDM yönteminin şematığı	7
Şekil 1.5: SLS cihazı	8
Şekil 1.6: SLA cihazı	9
Şekil 1.7: LOM cihazı	10
Şekil 1.8: PJM cihazının şematik görünümü	10
Şekil 1.9: Poliamid 66 ve Poliamid 6 liflerinin atomik bağ yapıları.....	11
Şekil 2.1: ESUN ePA-CF ticari kodlu PA66-20KE karbon elyaf takviyeli filament.	18
Şekil 2.2: Flashforge marka Creator 3 tipi 3B yazıcı.....	18
Şekil 2.3: Creator 3 manyetik tablası.	20
Şekil 2.4: Creator 3 ekstrüder başlığı.....	20
Şekil 2.5: Creator 3 itici motoru, dişli ve nozul tipleri.....	21
Şekil 2.6: Flahsprint 5 dilimleme programı ekran görüntüsü	22
Şekil 2.7: Dilimlenmiş parçanın bölümleri.	23
Şekil 2.8: Deneylerde kullanılan desen tipleri.	25
Şekil 2.9: PA66-20KE filament nemli olduğunda oluşan üretim hataları.	25
Şekil 2.10: Filament kurutma cihazı.	27
Şekil 2.11: Dijital kumpasla 3 nokta eğme numunesi et kalınlığı kontrolü.	28
Şekil 2.12: ASTM D638 çekme test numunesi ölçüleri.....	29
Şekil 2.13: Shimadzu 5 tonluk çekme test cihazı.....	29
Şekil 2.14: Çekme test öncesi ve sonrası boy uzama farkı kıyaslama.	30
Şekil 2.15: ASTM D 695 basma test numunesi ölçüleri.....	30
Şekil 2.16: Shimadzu 50kN test cihazı.	32

Şekil 2.17: Basma test a) numunenin ilk boyu b) testin durdurulduğu boyu.....	32
Şekil 2.18: ASTM D790 3 nokta eğme testi numune ölçüleri.	33
Şekil 2.19: Üç nokta eğme testi ölçüleri.	34
Şekil 2.20: Üç nokta eğme testinden görüntüler.	34
Şekil 2.21: 3 nokta eğme testi tamamlanma süreci.	35
Şekil 2.22: ASTM D256 standartlarında izod darbe numunesi.	36
Şekil 2.23: Alarge marka izod darbe cihazı ve deney numuneleri.....	37
Şekil 2.24: JEOL marka model JSM- 6060LV SEM görüntü cihazı.....	38
Şekil 2.25: Yüzey pürüzlülüğü cihazı.	39
Şekil 3.1: PA66-20KE filamentlere ait çekme testi.	41
Şekil 3.2: PA66-20KE filamentin gerilme-% uzama grafiği.	42
Şekil 3.3: PA66-20KE kompozit filamentten üretilen çekme test numuneleri.....	43
Şekil 3.4: Çekme testinden bir görünüş.	43
Şekil 3.5: PA66-20KE filament ile üretilen çekme test numunelerin çekme testi sonrası görselleri.	44
Şekil 3.6: Çekme testi sonuçları.....	44
Şekil 3.7: Çekme testi S/N grafiği.	46
Şekil 3.8: Karbon elyaf takviyeli PA66 kompozitin maksimum ve minimum çekme gerilme grafikleri.....	49
Şekil 3.9: Doğrulama deneyi sonuçları	50
Şekil 3.10: Basma testi numuneleri.....	52
Şekil 3.11: Basma testi esnasındaki görüntüsü.	53
Şekil 3.12: Basma deneyleri sonrası numune görüntüleri.....	53
Şekil 3.13: Basma testi sonuçları.	54
Şekil 3.14: Basma gerilmesi S/N oranları.	56
Şekil 3.15: Minimum ve maksimum basma gerilmesi grafiği	58
Şekil 3.16: Optimum basma test numunesinin basma gerilmesi grafiği.....	59
Şekil 3.17: Üç nokta eğme testi görüntüsü.....	60
Şekil 3.18: Üç nokta eğme testi sonrası numune görselleri.	60
Şekil 3.19: 3 nokta eğme testi.	61
Şekil 3.20: Maksimum ve minimum kuvvet elde edilen deneylerin grafiği.	63
Şekil 3.21: 3 nokta eğme deneyi S/N grafiği.	63
Şekil 3.22: Üç nokta eğme testi optimizasyonu sonrası elde edilen sonuçlar.....	65

Şekil 3.23: İzod darbe deneyi numuneleri.	66
Şekil 3.24: İzod darbe testinin görüntüleri.	67
Şekil 3.25: İzod darbe deneyi sonrası numune parçaları.....	67
Şekil 3.26: İzod darbe testi sonuçları.	68
Şekil 3.27: İzod darbe testi S/N grafiği.	70
Şekil 3.28: Yüzey pürüzlülüğü numuneleri.....	72
Şekil 3.29: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	72
Şekil 3.30: Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ortalamaları.	73
Şekil 3.31: Yüzey pürüzlülüğü testi S/N grafiği.	75
Şekil 3.32: PA66-20KE kompozit malzemenin minimum çekme gerilme elde edilen numunenin çekme test sonrası kırık yüzeyden Sem görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntüsü d) x200 büyütme görüntüsü.	77
Şekil 3.33: PA66-20KE kompozit malzemenin Bal peteği desen tipi ile üretilen numunenin çekme test sonrası Sem görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntüsü d) x200 büyütme görüntüsü.....	78
Şekil 3.34: PA66-20KE kompozit malzemedan Gyro tipi desen ile üretilen numunenin çekme testi sonrası alınan SEM mikroyapı görüntüleri; a) perspektif görüntü b) x25 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntü d) x200 büyütme görüntüsü.	79
Şekil 3.35: PA66-20KE kompozit malzemenin maksimum çekme gerilmesinin elde edildiği numunenin çekme test sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntüsü d) x200 büyütme görüntüsü.	80
Şekil 3.36: PA66-20KE kompozit malzemenin 255°C nozul sıcaklığında üretilen numunenin katmanlar arası arayüzey bağ yapısını gösteren SEM mikroyapı görüntüleri; a) perspektif görüntü b) x20 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntü d) x200 büyütme görüntüsü.....	82
Şekil 3.37: PA66-20KE kompozit malzemenin optimizasyon parametrelerine göre üretilen çekme test numunesinin test sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütme görüntü c) x100 büyütme görüntü d) x250 büyütme görüntüsü.....	83

KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİAMİD 66 FİLAMENT KULLANILARAK FDM TİPİ YAZICILARDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

ÖZET

Eriyik yığıma modelleme (Fused deposition modeling; FDM) birçok endüstri alanında plastik ve kompozitlerin üç boyutlu olarak yazdırılmasında yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Üç boyutlu yazıcı önceleri prototip amaçla geliştirirken, günümüzde imalata odaklı gelişmektedir. Üç boyutlu yazıcılarda imalat yapıldığında atık malzeme az olması ve kullanılan malzemelerin geri dönüşüm yapılarak tekrar kullanılması çevre kirliliğini azaltmaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile imalat yapılırken %0 ile %100 doluluk oranlarında üretim yapılabilir. Bu nedenle üç boyutlu yazıcıda doluluk oranının değişken olması hem baskı süresinin hem de kullanılacak malzeme ağırlığının az olması demektir. Bu da günümüzde hem maliyet açısından hem de çevre açısından çok önemlidir. Bu çalışmada 1,75 mm PA66-KE kompozit karbon elyaf filament kullanılmış olup, üretilen parçalara birçok mekanik test uygulanmıştır. Taguchi metodu kullanılarak yazdırma parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Bu bağlamda; nozul sıcaklığı, dış duvar sayısı, doluluk oranı ve desen tipi üretim parametreleri olarak seçilmiştir. Her bir parametre için üçer farklı seviye belirlenmiştir. Parametrelere seviyeleri olarak; üç farklı nozul sıcaklığı (255°C, 270°C ve 285°C), üç farklı dış duvar sayısı (5, 7 ve 9), üç farklı doluluk oranı (%40, %60 ve %80) ve üç farklı desen tipi (Doğrusal, Bal peteği ve Gyro) kullanılmıştır. Çekme testi için ASTM D638 tip 1, Basma testi için ASTM D695, 3 nokta eğme testi için ASTM D790 ve İzod darbe testi için ASTM D256 standartlarına uygun şekilde test numuneler üretilip deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına etki eden parametrelerin optimum değerleri Sinyal/Gürültü analizi ile elde edilmiştir. Ayrıca, Sinyal / Gürültü analizinden çekme, basma ve eğme testleri için parametre optimizasyonu yapılmıştır. Belirlenen optimum değerlere göre üçer adet numune tekrardan üretilip doğrulama deneyleri yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre doluluk oranı, nozul sıcaklığı ve dış duvar sayısı arttıkça mekanik özelliklerinde artış tespit edilmiştir. Optimizasyon parametreleri ile üretilen doğrulama numunelerinde yapılan mekanik testlerde de artış tespit edilmiştir. Ayrıca, parametrelerin etkinliği varyans analizi ile incelenmiştir. Ayrıca PA66-20KE malzemesi havadaki nemi emmeye müsait kompozit bir malzeme olduğundan dolayı, parça üretiminden hemen sonra ağırlık ölçümü alınmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında 10 gün bekletildikten sonraki ağırlık ölçümü de alınarak, 10 günlük ağırlık değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3D Yazıcı, Eklemeli İmalat, Optimizasyon, PA-CF, Karbon Filament

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PARAMETERS IN FDM TYPE PRINTERS USING CARBON FIBER REINFORCED POLYAMIDE 66 FILAMENT

ABSTRACT

Fused deposition modeling (FDM) is one of the most widely used techniques for three-dimensional printing of plastics and composites in many industries. While three-dimensional printers were initially developed for porotyping purposes, today they are focused on manufacturing. When manufacturing is done in three-dimensional printers, the waste material is less and the materials used are recycled and reused, reducing environmental pollution. When manufacturing with a three-dimensional printer, production can be made at 0% to 100% infill rates. For this reason, the variable infill rate in the three-dimensional printer means that both the printing time and the weight of the material to be used are low. This is very important today both in terms of cost and environment. In this study, 1.75 mm PA66-KE composite carbon fiber filament was used and many mechanical tests were applied to the produced parts. The optimum levels of printing parameters were determined using Taguchi method. In this context; nozzle temperature, number of outer walls, infill rate and pattern type were selected as production parameters. Three different levels were determined for each parameter. Three different nozzle temperatures (255°C, 270°C and 285°C), three different number of outer walls (5, 7 and 9), three different fill rates (40%, 60% and 80%) and three different pattern types (Linear, Honeycomb and Gyro) were used as parameter levels. Test specimens were manufactured and tested in accordance with ASTM D638 type 1 for tensile test, ASTM D695 for compression test, ASTM D790 for 3-point bending test and ASTM D256 for Izod impact test. The optimum values of the parameters affecting the test results were obtained by Signal/Noise analysis. In addition, parameter optimization was performed for tensile, compression and flexure tests from Signal/Noise analysis. Three specimens were reproduced according to the optimum values determined and verification tests were performed. According to the results of the experiments, it was determined that the mechanical properties increased as the infill rate, nozzle temperature and number of outer walls increased. An increase was also detected in the mechanical tests performed on the verification samples produced with the optimization parameters. In addition, the effectiveness of the parameters was analyzed by analysis of variance. In addition, since PA66-20KE material is a composite material that is capable of absorbing moisture in the air, weight measurement was taken immediately after the production of the part. Then, the weight measurement was taken after 10 days at room temperature and the 10-day weight change was analyzed.

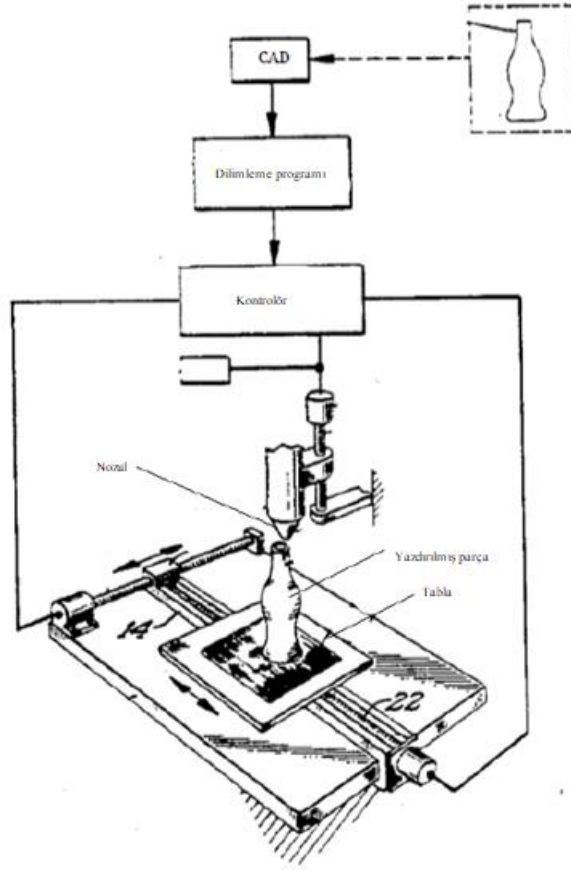
Keywords: 3D Printer, Additive Maufacturing, Optimization, PA-CF, Carbon Filament

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

Eklemeli imalat olarak da bilinen üç boyutlu yazdırma, nesneleri katmanlar halinde oluşturmak için kullanılan hızlı prototipleme teknolojisidir (Frazier, 2014; Taşdemir, 2021). Malzemelerin belirlenmiş olan düzlem üzerinde katmanları birleştirilerek nihai parçanın oluşturulduğu işlemdir. Düzlemde oluşturulan katmanların üst üste eklenme işlemi sonucunda üçüncü bir boyut elde edilir. Bundan dolayı eklemeli imalat teknolojisi, üç boyutlu üretim teknolojisi olarak da adlandırılır. Eklemeli imalat teknolojisindeki gelişmeler, imalat teknolojisine çok önemli bir vizyon katmıştır. Bu teknolojinin gelişimi ile birlikte tasarımlar çok farklılaşmıştır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmeyen karmaşık geometrilere sahip ürünler eklememeli imalat ile kolay bir şekilde üretilbilir hale gelmiştir (Li ve diğ, 2018; Pérez ve diğ, 2018). Böylece bu teknoloji ile tasarlanan ürünlerin hızlı ve düşük maliyetlerle üretilirlikleri sağlanmıştır (Campbell, Thomas Williams, Christopher Ivanova, Olga Garrett, 2012).

Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesine lazer teknolojileri, bilgisayar, yazılım ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler önemli oranda yardımcı olmuştur. 1980 yılında ilk tek ışınlı lazer kütleme yaklaşımı Hideo Kodama tarafından icat edilmiş fakat resmi olarak patent alınmamıştır. 1981 yılında Kodama, katmanları üst üste ekleyerek üç boyutlu bir figür üretme fikrini ortaya çıkarmıştır. 1989'da Crump additive manufacturing (eklemeli imalat yada katmanlı üretim) teknolojisini icat etti ve 1992 yılında patentini aldı (Narasaki ve diğ, 1979). Şekil 1.1'de Crupm tarafından geliştirilen Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM) cihazı gösterilmektedir.



Şekil 1.1: S.scott Crump tarafından sunulan orijinal FDM aparatı çizimi (Narasaki ve diğ, 1979).

Eklemeli imalat teknolojisinde herhangi bir parçayı üretmek için öncelikle bilgisayar destekli bir tasarım programı kullanarak, üretilecek olan parçanın üç boyutlu modelinin oluşturulması gerekir. Elde edilen tasarım STL dosyasına dönüştürülür. STL formatına dönüşen dosyayı üretim özellikleri ve katmanlara göre dilimleme işlemi yapılır. Dilimleme işlemi sonrasında eklemeli imalat makinesine göre uygun G kodları oluşturulur. G kodu ile parça cihaz üzerinde konumlandırılır ve nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, doluluk oranı ve deseni gibi üretim parametreleri belirlendikten sonra yazdırma işlemi başlatılır. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra parça bağlı olduğu platformdan çıkartılır. Temizleme işleminde destekleri ana yapıdan ayırma işlemi yapılır. Böylece parça, nihai ürün haline gelmiş olur. Parçanın kullanacağı yere göre boya işlemi, yüzey temizleme/zımparalama işlemleri veya montaj işlemleri yapılır. Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan üretim adımları özet olarak Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2: Eklemeli imalat teknolojisi üretim adımları (Campbell, Thomas Williams, Christopher Ivanova, Olga Garrett, 2012).

Birçok CAD programı, dataları Standard Triangle Language (STL) formatına dönüştürülebilmektedir (Vishwas ve Basavaraj, 2017). STL formatı stereolitografi teknolojisinde kullanılan dosya formatıdır. STL formatı, tasarlanmış olan üç boyutlu tasarımın yüzeylerini bir matematiksel kural doğrultusunda çok sayıda üçgen parça oluşturur (Q. Wang ve diğ, 2014). STL formatındaki datanın üçgen sayısı arttıkça daha fazla çözünürlük elde edilir böylece çözünürlük kaliteside artmış olur.

Eklemeli imalatta üretim özellikleri arasında öncelikli olarak yazdırma süresi çok önemlidir. Üretilcek olan numune veya parçanın baskı süresine etki eden önemli parametrelerden birisi desen tipi diğeri ise katman kalınlığıdır. Parçanın yüzey kalitesi katman kalınlığına bağlıdır. Katman kalınlığı ne kadar düşükse yüzey pürüzlüğü o kadar düşük olur fakat katman kalınlığının düşük olması baskı süresini uzatmaktadır (Bassett ve diğ, 2015).

1.1.1. Eklemeli imalatın avantajları ve dezavantajları

Eklemeli imalat yönteminde üretilcek parçanın direk kendisini oluşturmanın yeterli olması tasarımcılar açısından büyük esneklik sağlamaktadır (Sun ve diğ, 2024). Geleneksel imalat yöntemlerinde kullanılan kesici takımlara, soğuk şekillendirme araçlarına ve maçalara eklemeli imalat teknolojisinde gerek yoktur. Böylelikle

tasarımcılar, parçanın direk kendisini tasarlamakta ve daha karmaşık tasarımı üretebilme avantajına sahiptir. Çok karmaşık parçaların ayrı ayrı üretimi yapıldıktan sonra montaj işlemi uygulaması ortadan kalkmaktadır. Ayrıca talaşlı imalatta çıkan hurdalar olmadığından, atık miktarı oldukça azdır (Ma ve diğ, 2024). Karmaşık parçaların tek seferde üretim yapılabilmesi, istenilen doluluk oranı ya da istenilen bölgeyi özel üretim yapılabilmesi üretilecek olan parça için çok avantajlıdır. Parçanın üretimi için kalıba ihtiyacı yoktur. Kalıp maliyetini ortadan kaldırması maliyet açısından çok büyük bir avantaj sağlamaktadır (Ge ve diğ, 2024).

Günümüzde geri dönüşüme çok önem verilmekte olup kullanılan malzemenin tekrardan işlenip kullanılması hem maaliyet hem de çevre açısından çok önemlidir. Eklemeli imalatta kullanılan PLA, ABS gibi filamentlerin geri dönüştürülüp tekrardan işlenmesi çevre kirliliği azaltması açısından çok önemli fayda sağlamaktadır (Pinho ve diğ, 2020).

Eklemeli imalatta üretim boyutları sınırlıdır. Eklemeli imalatta yapılacak olan üretim, makinenin boyutuna ve kapasitesine göre sınırlanmaktadır. Geleneksel üretime göre büyük boyutta parça basılması pek mümkün değildir ve genellikle çok büyük olmayan parçalar basılmaktadır (Tang ve diğ, 2024).

Katmanlar arası boşluklar oluşması, katmanların iyi yapışmaması, katmanlar arası kaymalar gibi hassasiyetleri etkileyen hatalarda oluşabilmektedir (Gorelik, 2017). Eklemeli imalatın üretim malzemesi geleneksel üretime göre sınırlıdır ve malzeme seçimi eriyik filament ve toz partiküllerde belli malzeme çeşitlerinin dışında üretim yapılamamaktadır (Braga ve diğ, 2024).

1.1.2. Eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanları

Eklemeli imalat teknolojisi hızla gelişmekte olup yapılan araştırma çalışmalarının sonucundan ortaya çıkan avantajlar birçok sektörün dikkatin çekmiştir. İlk başlarda prototip üretme amaçlı kullanılmasına rağmen, yapılan geliştirmelerle çeşitli üretim yöntemleri gelişmekte olup kullanım alanları gelişmiştir (Taghizadeh ve Zhu, 2024). Günümüzde medikal, otomotiv, havacılık gibi farklı alanlarda aktif olarak kullanılmaktadır. Medikal sektöründe prototip üretimi için yaygın kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca, malzemelerin biyo uyumlu olması geleneksel üretilen prototip

parçaya göre insan vücudunda daha fazla uyum sağlaması ve alerji oluşturmaması gibi önemli avantajlar sağlamasından dolayı yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Clegg ve diğ, 2023; Mbogori ve diğ, 2022; S. Singh ve diğ, 2019). Otomotiv ve havacılık sektörlerinde ise hafiflik sağlanması gereken kısımlarda kullanılması ön plana çıkmaktadır. Uzay araçlarında süper alaşım toz partiküllerinden üretim yapılarak uzay aracın motor gövdesi ve kanatları üreterek kullanıyorlar (Ghidini ve diğ, 2023). Süper alaşımların talaşlı imalatları oldukça zordu ve eklemeli imalat yöntemiyle karmaşık olan tasarımı tek seferde yapıldığından dolayı uzay araçların üretiminde yaygın kullanılmaktadır (Godec ve diğ, 2021; Ng ve diğ, 2022; Pavithran ve diğ, 2023; Valdez ve diğ, 2017).

1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat teknolojisinin yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonucunda zamanla gelişen farklı yöntemler de eklenerek eklemeli imalat yöntemi dört ana patent üstünde kurulmuştur. Eklemeli imalat teknolojisinin dört ana patent şunlardır: malzeme ekstrüzyonu, bağlayıcı püskürtme, foto polimerizasyon, toz füzyonu teknikleridir (Narasaki ve diğ, 1979; Ramli ve diğ, 2020). Eklemeli imalat teknolojisi ASTM standartlarına göre 7 farklı kategoriye Şekil 1.3'te ayrılmıştır.

Yöntem	Teknoloji	Kullanılan Malzeme	Kullanılan Enerji
Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik Yığıma Modelleme (FDM)	Termoplastik	Termal Enerji
		Seramik Çamurları	
		Metal Macunları	
Toz Füzyonu	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamid / Polimerler	Yüksek Güçte Lazer Işını
	Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	Metal Tozları	
	Seçici Lazer Eritme (SLM)	Seramik Tozları	
	Elektron Işını Eritme (EBM)		Elektron Işını
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer	Ultraviyole Lazer
		Seramikler	
Malzeme Püskürtme	Polyjet-Inkjet Baskı	Fotopolimer	Termal Enerji
		Vaks	
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtmeli Baskı (Binder 3DP)	Polimer Tozları	Termal Enerji
		Seramik Tozları	
		Metal Tozları	
Katman Laminasyonu	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Polimer Film	Lazer Işını
		Metal Sac	
		Seramik Bant	
Yönlendirilmiş Enerji Birikimi	Lazerle Tasarlanmış Net Şekil (LENS)	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
	Elektronik Işın Kaynağı (EBW)		

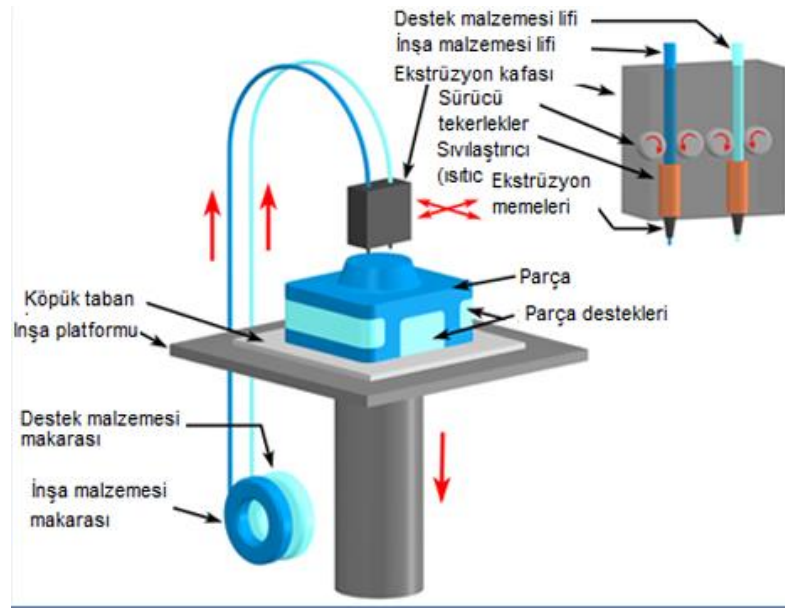
Şekil 1.3: Eklemeli imalat teknolojisinin ASTM standartlarına göre sınıflandırılması.

1.2.1. Eriyik biriktirme modelleme

Eriyik biriktirme modelleme diğer adıyla üç boyutlu baskı teknolojisi, Steven Scott Crump tarafından 1989 yılında ilk geliştirildikten sonra, 1992 yılında patenti alındı. Sonrasında Stratasys firmasıyla ilk ticari boyuttaki FDM cihazı pazarlanmaya başlandı (Narasaki ve diğ, 1979). Bu imalat teknolojilerinin tamamı günümüzde ticari olarak kullanılmakta olup teknolojinin kendilerine ait avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Bu teknolojiler içerisinde malzeme ekstrüzyon teknolojisi olan FDM, polimerlerin/kompozitlerin fonksiyonel prototiplerini hazırlamak için kullanılan düşük maliyetli bir eklemeli üretim tekniğidir (R. Kumar ve diğ, 2018; R. Singh, Kumar, Farina, De Piano, ve diğ, 2019). FDM teknolojisinde parça, bir metal nozuldan yarı sıvı halde termoplastik filamentin katmanlar halinde extrüde edilmesiyle oluşturulur (Auffray ve diğ, 2022). İlk başlarda tek ekstrüder kullanılarak başlanan bu teknolojiye son zamanlarda iki veya daha fazla ekstrüder kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle ekstrüder sayısındaki artış, aynı anda iki veya daha fazla ürünün üretilmesi, aynı yapı içerisinde birden fazla farklı malzemenin kullanımı gibi avantajları da beraberinde getirmiştir. Aynı yapı içerisinde birden fazla farklı malzemenin kullanılması, sertlik, korozyon, aşınma direnci, çekme ve basma gerilmesi gibi özelliklerin geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir (Kumar Mawandiya ve diğ, 2022).

Eriyik biriktirme modelleme yönteminde üretim yapılması için ilk önce üç boyutlu tasarımın yapılması gereklidir. Bilgisayar destekli tasarımından oluşan CAD modeli STL formatına çevrilir ve STL formatına dönüşen bu datayı üretim yapılacak olan FDM tipi makineye uyumlu dilimleme programında üretim parametreleri belirlenmektedir (Herschdorfer ve diğ, 2021; Park ve Shin, 2018; X. Wang ve diğ, 2021; Yamamoto ve diğ, 2022; L. Zhang ve diğ, 2024). Üretim parametrelerinden: üretilen malzeme seçimi yapılması ve nozul sıcaklığı, üretim yapılacak olan platform olan tabla sıcaklığı, yüzey kalitesine etki eden katman kalınlığı üretilen parçanın istenilen kalitesine göre uygun olan seçilir (Das ve diğ, 2020; Gonzalez ve diğ, 2022; Khabia ve Jain, 2019; Mitchell ve diğ, 2018; S V ve diğ, 2024; Vaňková ve diğ, 2023). Eriyik biriktirme modelleme yönteminde üretim kalitesine diğer etki eden parametrelerden birisi olan desen tipi önemlidir ve nereye kullanılacak ve istenilen özelliklerden en iyisi seçilmelidir. Doluluk oranı, eklemeli imalatla üretilen parçayı

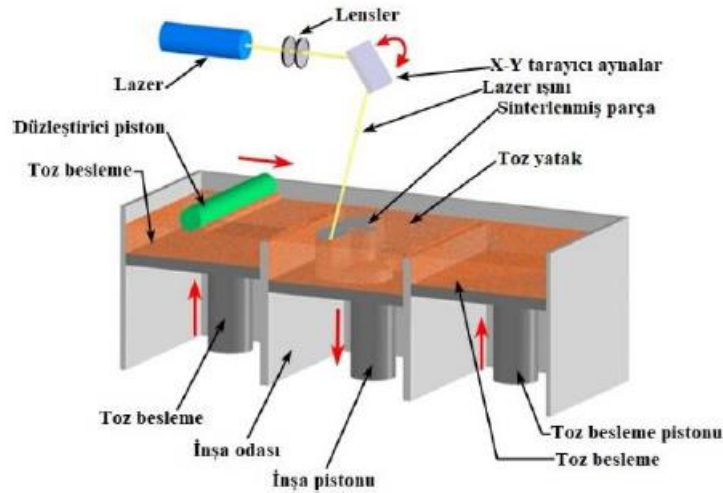
hafifleten en önemli parametredir (Akhondi ve diğ, 2023; Alagheband ve diğ, 2024; Chen ve diğ, 2022; Mahesh ve diğ, 2023; Racz ve Dudescu, 2024). Bu da geleneksel yöntemlerden farklı kılan özelliklerden birisidir. Tüm üretim parametreleri girildikten sonra G-Kodu oluşturulur ve baskı başlatılır. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde baskı başlaması için ilk önce baskı basılacak olan üretim platform olan tabla verilen sıcaklığa kadar önce ısıtılır ve o sıcaklıkta üretim bitene kadar sabit kalır. Tabla ısınma işlem tamamlandıktan sonra üretim yapılacak olan nozul girilen sıcaklığa kadar ısıtılır ve üretim başlar. Üretimi yapılacak olan tablanın malzemeye göre sıcak seçilmesinin sebebi ise ilk katmanın platformun üzerinde sağlam tutulmasını sağlamaktır. Ayrıca üretimin ilk katman hızı normal üretim yapılacak olan hızından yavaş olmaktadır ve ilk katman platforma iyi tutunması ve şeklin doğru şekilde yerleştikten sonra ikinci katman başlarken normal üretim hızında baskıya devam edilecektir. Parçanın geometrisi ile üretim gerçekleştirilecek olan cihaz konumlandırmasına göre bazı katmanların basılabilmesi için destek yapıları eklenmelidir ve destek parçalar üretim bittikten sonra kolaylıkla ayrılarak temizlenmektedir. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılan malzeme polimer malzeme olmakta ve ince tel (filament) şeklindedir (Podgórski ve diğ, 2023). Şekil 1.4'te FDM tipi cihazın şematik görseli verilmiştir.



Şekil 1.4: FDM yönteminin şematiki (Özsoy ve Duman, 2017).

1.2.2. Seçici lazer sinterleme

Seçici lazer sinterleme teknolojisini Carl R. tarafından 1980’li yıllarında yapmış olduğu çalışmalarda keşfetmiş ve patentini almıştır. Seçici lazer sinterleme küçük polimer tozu parçacıklarını özellikle poliamid sinterlemek için yüksek güçlü lazer ışın üreten bir toz yatak füzyon teknolojisidir. İnce bir toz tabakası bir yapı hazinesinden üretim yapılan platforma dağıtılır. Üretim işlemi katman halinde gerçekleşmektedir. Tarayıcı sistem sayesinde her bir katmanı tarar ve o katmanın pozisyonu belirlenir (Gibson ve Shi, 1997). Bir sonraki katmanı üretebilmesi için bir önceki katmanın üzeri tozla kaplanarak yeni katmana odaklanarak önceki katman üzerine yeni katman eklenir. Bu teknolojinin ön plana çıkması destek malzemeleri kullanmaya gerek duyulmadan parçayı direk üretebilmesi üretim hızı hızlı olması demektir. Yüzey kalitesi orta seviyededir. Parça üretimi bittikten sonra parçanın soğuması beklenir (S. Kumar, 2003; Lee ve diğ, 2014). Şekil 1.5’te SLS cihazın görüntüsü verilmiştir.

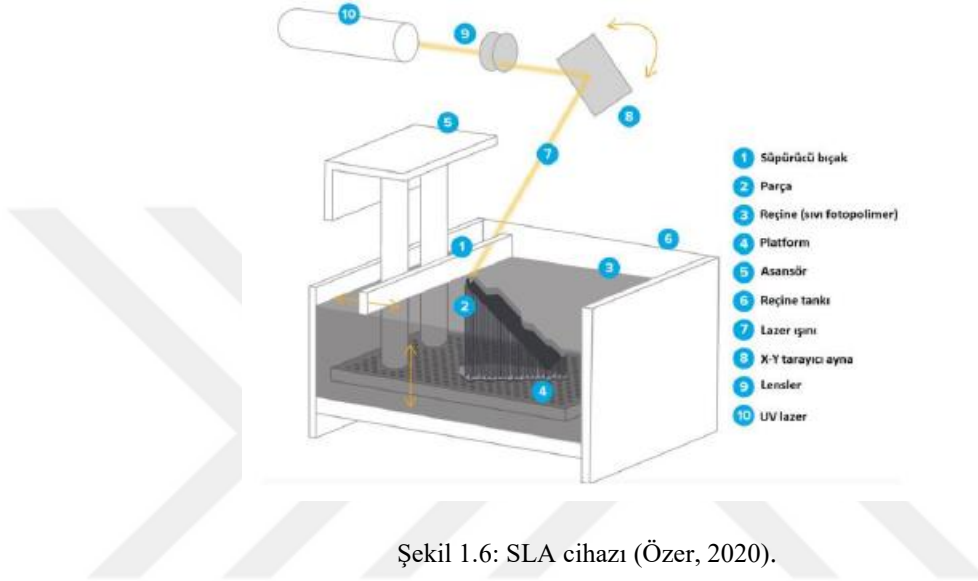


Şekil 1.5: SLS cihazı (Özer, 2020).

1.2.3. Stereolitografi (SLA)

Şekil 1.6’da Stereolitografi cihazın şematik görüntüsü verilmiştir. SLA teknolojisi sıvı haldeki fotopolimer reçine kullanılır (De Pasquale ve diğ, 2018). Akışkan reçineye ultraviyole lazer ışını göndererek kürleşme işlemi yapılır. Bir sonraki katman yapılması için önceki katmana fotopolimer reçine serilir ve aynı işlem uygulanır (Karalekas ve Aggelopoulos, 2003; Zhao ve diğ, 2020). SLA teknolojisinde kullanılan reçine malzemeler çapraz bağa sahip olduğundan dolayı tekrar kullanılamaz (Phillips

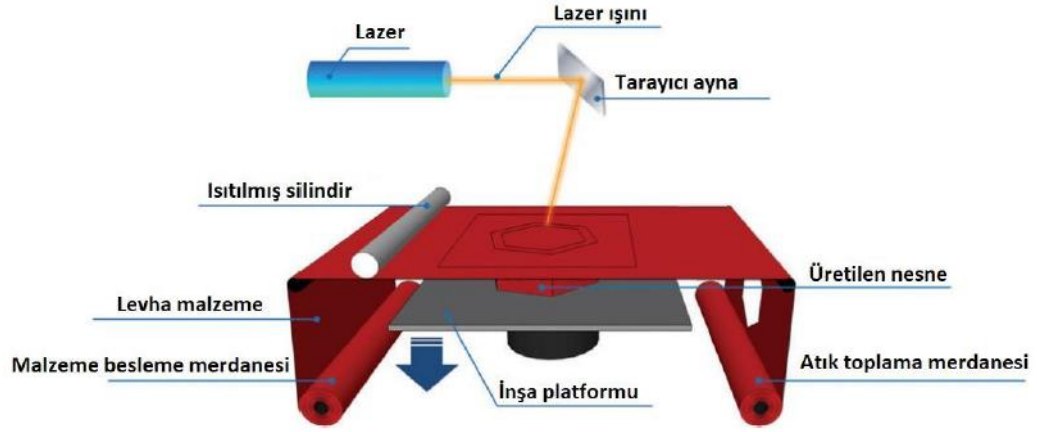
ve diğ, 2020). SLA teknolojisi FDM tipi yazıcı gibi destekleyici yapıların kullanıldığı malzemelerle destekler üretilir. Stereolitografi teknolojisinde kullanılan sıvı reçineler ışığa duyarlı polimer malzeme olması söz konusudur (Quagliato ve diğ, 2022). Bu yöntem, çok karmaşık parçaların üretiminin yapılmasını imkan tanırken, reçinesi ve cihazları maliyet açısından pahalıdır.



Şekil 1.6: SLA cihazı (Özer, 2020).

1.2.4. Lamine nesne imalatı (LOM)

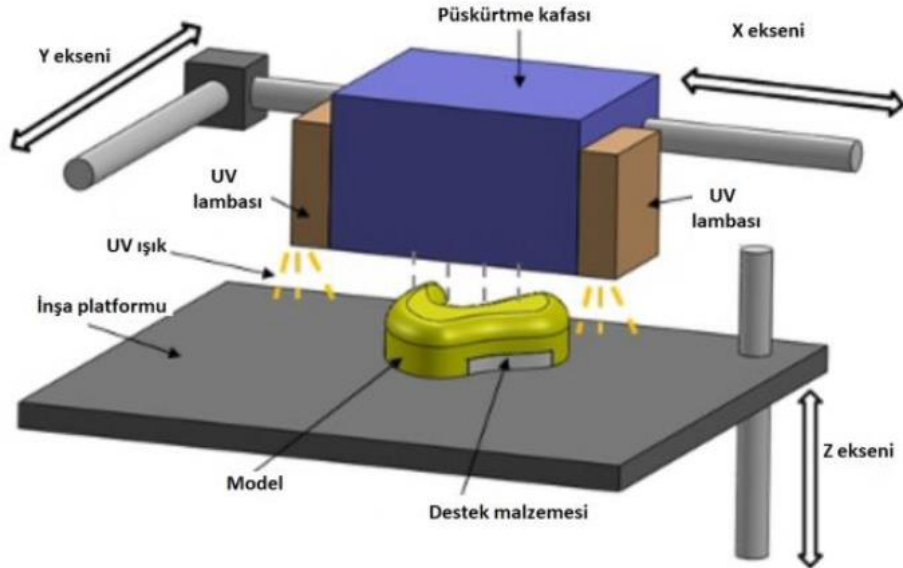
LOM teknolojisinde, levha malzeme üretim yapılacak platforma serilerek üretilcek parçaya göre lazer yardımıyla kesilir. Kesme işlemin sonrası üstüne ilave edilen levha parçasını bir önceki parçayla birleştirmek için ısıtılmış silindir yardımıyla basınç uygulanır. (G. Zhang ve diğ, 2021). Her bir katman lazer yardımıyla kesilerek kesimden sonra atık parçalar temizlenir işlem bitene (nihai parça üretilene) kadar devam edilir (Krinitcyn ve diğ, 2017). LOM yönteminde sıvı reçine veya filament gibi malzeme kullanmak yerine sac formunda katı levha malzeme kullanılmaktadır. Şekil 1.7’de cihazın şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.7: LOM cihazı (Özer, 2020).

1.2.5. Polyjet modelleme (PJM)

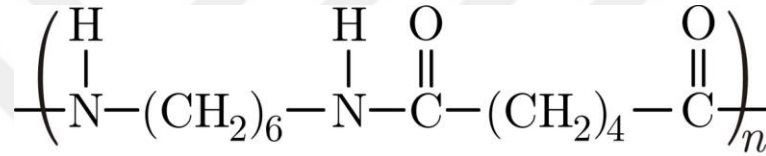
Bu yöntem çok sayıda ayrı ayrı nozuldan reçine püskürtülerek UV ışını yardımıyla püskürtülen reçineleri kürleşmesi sağlanır. Polyjet teknolojisi ile yumuşak malzemeler, sert malzemeler ve biyouyumlu malzemelerle baskı yapılmaktadır. UV ışınla kürleştiğinden dolayı baskı hassasiyeti yüksektir. Bu yöntemle hassas parçalar üretilabilmektedir (Gay ve diğ, 2015; Udriou ve Braga, 2017). Şekil 1.8’de Polyjet modelleme yönteminin şematik görünüşü verilmiştir.



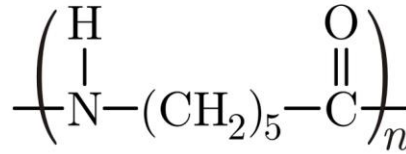
Şekil 1.8: PJM cihazının şematik görünümü (Udriou ve Braga, 2017).

1.3. Poliamid 66

Carothers ve arkadaşları 1935 yılında heksamentilendiamin ve adipik asidin polikondensasyonu ile sentezlediler ve bugünkü ismiyle Poliamid 66 (PA 66)'yı elde etmeyi başardılar. Du Pont firması tarafından ticarileştirilip 1939 yılında Poliamid 66 ticari adını alarak piyasaya satışa başlamıştır (Mutel, 2002). Poliamid 66 malzemesi tekstil ve plastik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. 6 karbon atomu içermekte olup iki monomerden oluşur. Poliamid 66 ısıya dayanıklı, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet değerine sahiptir. Hafif bir termoplastik olup kristal yapıya sahiptir (Portarapillo ve diğ, 2022). PA66 tarım, otomotiv, inşaat ve ambalaj gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Şekil 1.9'da poliamid 66 atomik bağ yapısının şematik görüntüsü verilmiştir.



Nylon 66



Nylon 6

Şekil 1.9: Poliamid 66 ve Poliamid 6 liflerinin atomik bağ yapıları.

1.4. Karbon Elyaf

Karbon elyaf, %95'ten fazla karbon atomlarından oluşan çok ince bir elyafa karbon elyaf diğer adıyla karbon elyaf denir. Karbon elyafın en yaygın hammaddesi %80 oranında poliakrilonitril (PAN) oluşturmakta olup ayrıca zift, rayon gibi organik liflerde hammadde olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaf kısmen mekanik, kısmen de kimyasal işlemlerden geçerek elde edilir (Khayyam ve diğ, 2020). Karbon elyafı kompozit malzeme sınıfında yer almakta olup avantajları: çeliğe göre 5 kat daha mukavemetlidir, çelikten 4 kat daha hafif, elektrik iletkenine sahip, ısı yalıtkanlığı yüksek, korozyon ve yorulmaya dayanıklı bir malzemedir (Yaman ve diğ, 2006).

Karbon elyafı veya diğer adıyla karbon elyafın başlıca kullanım alanları savunma sanayi, enerji, havacılık ve uzay sanayi ve otomotivdir.

1.5. Literatür İncelemesi

Singh ve arkadaşları (R. Singh, Kumar, Farina, Colangelo, ve diğ, 2019) FDM yöntemini kullanarak ABS/PLA/HIPS üç farklı polimer malzemenin bir arada kullanımını üzerine bir çalışma yaptılar. Ürettikleri numunelerin termal ve mekanik özelliklerini incelediler. Özellikle tek başına düşük çekme dayanımına sahip HIPS'in diğer malzemeler ile kullanımıyla kapasitelerinin arttığını belirttiler. Buradan malzemelerin birlikte kullanımı ile mekanik özelliklerinin geliştirilebileceğini gösterdiler.

Lopes ve arkadaşları (Lopes ve diğ, 2018) malzeme afinitesinin sınır arayüz performansı üzerindeki etki üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında PLA, TPU, PET olmak üzere 3 farklı malzeme kullanarak FDM teknolojisi ile çekme numuneleri ürettirler. Seçilen malzeme çiftlerinin kalitesini değerlendirmek için önerilen metodolojinin yenilikçi ve çok malzemeli baskı tekniklerinde sınır tasarımının önemli olduğunu belirttiler. Yapılan çalışma neticesinde seçilen malzemeler arasında kimyasal afinitenin olmamasının performans kaybını oldukça olumsuz etkilediğini belirttiler.

Turaka ve arkadaşları (Turaka ve diğ, 2024) %20, 40, 60 ve 80 oranda doluluk yoğunluğunun gerilme, eğilme sıkıştırma, kırılma davranışlarına nasıl etki ettiği çalışma yaptılar. Çalışmalarda ABS ve CF-ABS malzeme kullanarak FDM teknolojisi ile numuneleri ürettirler. Deney sonuçlarından %80 doluluk oranlı ve desen tipi bal peteği CF-ABS numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzamada önemli gelişmeler elde ettiğini belirttiler. Doluluk yoğunluğunun optimize etmenin, parçaların mekanik özelliklerine önemli oranda etki etmekte olduğunu ve parçayı hafiflettiğini belirttiler.

O'Driscoll ve arkadaşları (O'Driscoll ve diğ, 2024) farklı katman yüksekliği ve farklı doluluk oranının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdılar. Çalışmalarında RPET_1 ve RPET Ultrafuse malzemelerini kullanarak FDM teknolojisi ile deney numunelerini ürettirler. 3D baskılı numunelerden elde edilen çekme testi analizinde

gözlemlendiği gibi, katman kalınlığının 3D baskı için mekanik özellikler üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu belirttiler.

Karad ve arkadaşları (Karad ve diğ., 2023) farklı desen tiplerin mekanik özellikleri ve sonlu elemanlar analizindeki etkisini araştırdılar. Çalışmalarında eriyik biriktirme modelleme yöntemini kullanarak ABS malzeme ile çizgi, üçgen ve dik dörtgen şeklinde desen tiplerinde çekme test numuneleri ürettirtiler. %25 doluluk oranda dik dörtgen desenlerin üçgen desen tiğlerine göre daha iyi performans gösterdiğini belirttiler.

Pratheesh Kumar ve arkadaşları (Pratheesh Kumar ve diğ., 2024) karbon elyaf takviyeli ABS filamentin boyutsal doğruluğu üzerindeki etkisini incelendiğini belirttiler. Deney seti olarak Taguchi L27 ortogonal dizinini kullandılar. Deneyde farklı doluluk oranları, farklı baskı hızı ve farklı katman kalınlıkları kullanıldılar. En düşük baskı hatasını %55 doluluk oranda, baskı hızı 60 mm/sn ve katman kalınlığı 0,225 mm elde ettiklerini belirttiler. Ayrıca en büyük etkiye sahip olan faktörün baskı hızı olduğunu belirttiler.

Abhay ve arkadaşları (Mishra ve diğ., 2023) farklı üretim açıları, farklı katman kalınlıkları ve farklı desen tiplerinin mekanik özelliklere etkileri üzerine bir çalışma yaptılar. Eklemeli imalat teknolojilerini kullanarak ABS malzemeden çekme test numunesini ürettirtiler. Deney numuneleri Taguchi L9 ortogonal dizisi ile tasarladılar. Çekme test sonuçlarında 0,3 mm katman kalınlığında 60° yönle üretilen numunede 9,22 MPa elde ettiklerini belirttiler. Katman kalınlığı 0,2 mm ve 0,3 mm büyük etki gösterdiğini ayrıca zikzak desen tipi çekme mukavemetin maksimum etki oranına sahip olduğunu belirttiler.

Rodriguez ve arkadaşları (Rodríguez-Reyna ve diğ., 2022) PLA, ABS, ve Poliamid karbon elyaf gibi 3 farklı malzemenin mekanik özelliklerin incelediler. Numuneleri FDM tipi üç boyutlu yazıcı ile ürettirtiler. Üretim parametreleri farklı desen tipleri, farklı doluluk oranlar ve farklı üretim açıları seçilerek her bir malzeme için 27 adet numune toplamda 81 adet çekme test numunesi ürettiklerini belirttiler. Çekme deney test sonucunda ABS yarı kırılğan davranış gösterirken PLA ve poliamid-karbon elyaf için sünek bir davranış sergilendiğın vurguladılar.

Sandanamsamy ve arkadaşları (Sandanamsamy ve diğ, 2023) eriyik biriktirme modelleme yöntemi ile PLA malzeme kullanarak numunenin çekme gerilme inceleme çalışmalarını yaptılar. Çekme numunesini farklı baskı sıcaklıklarında ve farklı yönlerde üreterek çekme dayanımına etki eden faktörleri belirlediler. Elde edilen deney verilerine göre PLA malzemesinin baskı sıcaklığı artıkça çekme dayanımında ve akma dayanımında artış olduğunu, 90° açıyla basıldığında en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu 0° açıyla üretilen numunelerde en düşük çekme mukavemeti elde ettiklerini belittiler.

Nabavi-Kivi ve arkadaşları (Nabavi-Kivi ve diğ, 2022) baskı hızının kırılma davranışları üzerindeki etkisini araştırdılar. Çalışmalarında ABS malzeme kullanarak FDM teknolojisini kullanarak kırılma ve çekme test numuneler ürettir. Numuneleri 430, 50, 7 ve 90 mm/sn'lik 4 farklı baskı hızı kullandılar. Elde edilen kırılma direnci 50 mm/ sn ile üretilen numunede elde edildiğini belittiler.

Venkateswar Reddy ve arkadaşları karbon elyaf takviyeli PLA'nın gerilme mukavemetinin iyileştirmesinde parametrelerin önemi üzerine bir çalışma yaptılar. Taguchi tasarımı yardımıyla numune üretim setini hazırladılar. Parametreleri sırasıyla doluluk oranı %60, %80 ve %100, baskı hızı 80 mm/ sn, 100 mm / sn ve 120 mm / sn, katman kalınlığı 0,1, 0,2 ve 0,3 mm seçildiğini belittiler. Çekme test verilerine göre sırasıyla doluluk oranı, baskı hızı ve katman kalınlığı en etkili parametreleri olduğunu belirttiler (Venkateswar Reddy ve diğ, 2023).

Venkateswar Reddy ve arkadaşları (Venkateswar Reddy ve diğ, 2023) PLA numunelerin çekme ve darbe özelliklerin etkisi üzerine çalışma yaptılar. Çalışmalarında PLA malzeme kullanarak 2 farklı FDM teknolojisi ile numuneleri ürettir. Prusa marka yazıcı ise filament çapı 1,75mm ise 3D Platform yazıcıda 2,85 mm çapında filament kullandılar. Deney sonuçların elde edilen verilere göre katman kalınlığının çekme mukavemeti üzerindeki etkileri belittiler. 45° baskı yönünde daha düşük veriler elde edilirken 0° ve 90° yönünde üretilen numunelerin darbe testinde daha dayanıklı olduğunu belirlediklerini vurguladılar.

Golubovic ve arkadaşları (Golubovic ve diğ, 2024) 3 farklı eklemeli imalat yöntemi kullanarak mekanik özellikleri incelediler. Bu farklı yöntemler FDM, SLA ve DLP yöntemi ile ABS çekme numuneleri ürettir. Elde edilen çekme dayanım test

sonuçlarına göre SLA teknolojisi ile üretilen çekme numunesinde en iyi sonuç elde ettiklerini belirttiler.

J. Singh ve arkadaşları (J. Singh ve diğ, 2022) farklı baskı yönleri ve farklı doluluk oranının malzemenin mekanik davranışı üzerine bir çalışma yaptılar. Çekme numunelerinin üretim parametreleri tam faktöriyel olmak üzere toplamda 27 adet çekme test numunesini PLA malzeme kullanarak 3 boyut yazıcı ile ürettir. Çekme deney sonuçlarına göre baskı yönü ve doluluk oranının en önemli parametreler olduğunu belirttiler.

Cheng ve arkadaşları (Cheng ve diğ, 2024) geri dönüştürülmüş karbon elyaf malzemenin 3 boyutlu yazıcıda farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklerine etkileri çalışma yaptılar. Çekme test numunesi üretim parametreleri ise desen tipleri, baskı hızı, katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı olarak belirttiler. Çekme test sonuçlarında elde edilen verilere göre 215°C -220°C sıcaklığı aralığında optimum seviyede olduğunu belirttiler. Baskı hızı 20-40 mm/sn olduğunda mekanik özellikler önemli ölçüde değişmezken 40 mm/sn'yi aştığında mekanik özellikleri önemli ölçüde azaldığını vurguladılar. Chengjun ve arkadaşları (Zeng ve diğ, 2021) 3 boyutlu baskıda sürekli elyaf kompozit malzemenin sandviç yapıların bükülme performansın incelediler. Farklı desenlerde üretilen sandviç yapıların üç nokta eğme test numunelerini ürettir. Sandviç iç yapının yüksekliği arttıkça, daha fazla bükülme momentine dayandığını belirttiler.

Ali ve arkadaşları (Ali ve diğ, 2023) doluluk oranı, baskı yönü ve ısıtıl işlemin 3 boyutlu yazıcı ile üretilen poliamid ana matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin çekme test özelliklerin etkisi çalışma yaptılar. Çalışmada farklı desen tipi olan altıgen, dikdörtgen ve üçgen olarak seçilirken, doluluk oranı %30, %50 ve %100 olan çekme test numunelerini ürettir. Çekme testi sonuçlarına göre %30 ve %50 boşluklu çekme test numunelerinde üçgen desen tip yapının daha iyi performans sergilendiğini vurguladılar.

Ding ve arkadaşları (Ding ve diğ, 2023) sürekli karbon ve cam elyafın hibrit yerleşimi ve mekanik özelliklerini incelediler. Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcı ile çekme ve darbe numuneleri ürettir. Nozul çapı 0,35mm saf poliamid, sürekli karbon elyaf ve cam elyaf malzemeleri deney numune üretiminde kullandılar. Deney numunelerinde ana matrisi poliamid malzemeye 1 kat karbon elyaf ayrıca cam elyaf içinde 1 katman

katılacak şekilde poliamid malzemeye 1, 3, 6 ve 12 katman eklenecek şekilde tasarladılar. Çekme test sonuçlarına göre maksimum gerilme mukavemetini 12CF kodlu numunede 585 MPa bulduklarını belirttiler.

Su ve arkadaşları (Su ve diğ, 2022) geri kazanılmış karbon elyaf takviyeli poliamid filamentlerin 3 boyutlu baskısının mekanik inceleme çalışmalarını yaptılar. Bu çalışmada farklı lif ağırlıkları (%10, %20, %30 ve %40) lifleri poliamid malzemeye katarak numuneleri üretilmiştir. Kullanılan filamentler 2,85 çapında filamentler kullanıldığı vurguladılar. Çekme deney de elde edilen verilere göre %40 ağırlığında lif eklenen numunelerde liflerin en zayıf hizalama oluştuğunu vurguladılar. Çekme mukavemetin en büyük gelişmeleri %20-30 ağırlığındaki liflerde elde ettiklerini belirttiler.

Islam ve arkadaşları (Islam ve diğ, 2023) poliamid ana matrisi karbon elyaf ekleyerek liflerin tipi ve oryantasyonun inceleme çalışmalar yaptılar. Ana matris içerisine %20 oranda karbon elyaf ilave ederek 3 boyutlu yazıcı ile çekme numuneler elde ettiklerini belirttiler. Numunelerin farklı baskı yönde üretilmesi ve saf poliamid filament ile karbon elyaf ilave edilen karışık kompozit elyafı karşılaştılar.

Rodriguez ve arkadaşları (Rodríguez-Reyna ve diğ, 2024) dinamik yüklere maruz kalan 3 farklı malzemeleri için tasarım optimizasyon çalışma yaptılar. Bu çalışmada PLA, ABS ve karbon elyaf takviyeli poliamid malzeme kullanarak 3 boyutlu yazıcı yardımıyla numunelerin ürettir. Üretim parametrelerinde baskı hızı, nozul sıcaklığı, desen tipleri ve baskı yönü seçildiğini belirttiler. Doluluk oranı %33, %66 ve %100 şeklinde, baskı yönü 0°/ 90° ve +45°/-45° olarak belirttiler. Yüzde yüz, dolu baskı yönü 45° PLA ve karbon elyaf karışımı çekme dayanımının en yüksek olduğunu belirttiler. Bu çalışmanın değer çalışmalardan farkı olan desen tipi farklı yönler ile üretilmesi ve mekanik özelliklerini incelediler.

BÖLÜM 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, deney numuneleri Esun markasına ait PA66-20KE filament ile üretilmiştir. çekme testi numuneleri ASTM D638 type-1 standardına; üç nokta eğme test numuneleri ASTM D790 standardına; basma test numuneleri ASTM D695 standartlarına, darbe test numuneleri ise ASTM D256 standardına uygun olarak üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde Flashforge Creator 3 markalı üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Üç boyutlu (3B) yazıcıda üretilen numunelerin çekme dayanımı, basma gerilmesi, darbe dayanımı, maksimum ve minimum basma gerilmesi, eğilme dayanımları incelenmiştir. Ayrıca maksimum ve minimum değerlerde SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir.

2.1. Filament

Bu tez çalışmasında Esun markasına ait karbon elyaf takviyeli ticari ismi ePA-CF filament kullanılmıştır. Bu filamentin ana matrisi Poliamid66 olup, %20 oranında karbon elyaf eklenmiş bir termoplastik filamenttir (Şekil 2.1). Filament çapı 1,75mm'dir. Yüksek tokluk ve darbe direncine ihtiyacı olan parçaların basılması için uygundur. Yüksek sıcaklık direncine sahiptir ve ısı deformasyon sıcaklığı 155°C'ye kadardır (Speed, 2021). Bu tez çalışmasında karbon elyaf takviyeli filament kullanarak farklı nozul sıcaklıklarında, farklı dış duvar sayıları, farklı doluluk oranları ve farklı desen tiplerini kullanarak ASTM standartlarına uygun şekilde test numuneleri üretilmiştir. Karbon elyaf takviyeli filamentten 1 kg'lık bir adet filament temin edilerek dört farklı deney için numune üretimleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1: ESUN ePA-CF ticari kodlu PA66-20KE karbon elyaf takviyeli filament.

2.2. Üç Boyutlu Yazıcı (3B Yazıcı)

Bu tez çalışmasında kullanılan test numunelerinin üretimi için Flashforge Creator 3 cihazı kullanılmıştır. Cihazın baskı hacmi 300 x 250 x 200 mm'dir. Bu cihazda 1,75 mm çapında filamentler ile baskı yapılmaktadır. Creator 3 yarı endüstriyel bir cihazdır. Performans ve baskı kalitesinin iyi olması, çok çeşitli filament türleri kullanabilmesinden dolayı piyasada tercih edilmektedir. Tablo 2.1'de cihazın teknik özellikleri sunulmuştur. Bu cihazda çift ekstrüder olduğu için iki farklı malzemeden oluşan baskı yapabilmektedir. Yükseklik kalibrasyon hassasiyetine sahip olduğu için kaliteli baskı elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan 3B yazıcı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Flashforge marka Creator 3 tipi 3B yazıcı.

Tablo 2.1: Creator 3 3B yazıcı teknik özellikleri.

Teknik Özellik	Değeri
Baskı Metodu	FDM
Baskı Hacmi (mm)	300 x 250 x 200
Paket Ağırlığı (kg)	40
Ekstruder	2 adet bağımsız ekstruder
Hareket Hızı (mm/s)	10-150
Filament Çapı (mm)	1,75
Filament Çeşidi	PLA, ABS, PVA, PETG, HIPS, PA, PC, WOOD, ASA, PA-CF, PA-GF, FLEX
Baskı Kalınlığı (mm)	0,05-0,4
Nozul (mm)	0,4
Hassasiyet (mm)	0,05
Dosya Biçimi	STL
Dilimleme Programı	FlashPrint
Maksimum Nozul Sıcaklığı (°C)	300
Maksimum Tabla Sıcaklığı (°C)	120

Creator 3 tipi 3B yazıcının orijinal tablası manyetik özellik içerdiği için, baskı sonrası tabla platformdan çıkartılarak üretilen parçanın ayırma işlemi kolayca gerçekleştirilir. Manyetik tabla olduğu için cam tablaya göre kullanım ömrü uzun değildir ve defalarca tekrarlanan baskı işleminden dolayı tablada aşınma başlayacaktır yeni tablayla değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 2.3’de Creator 3’e ait manyetik tabla görseli verilmiştir.



Şekil 2.3: Creator 3 manyetik tablası.

3B yazıcının ekstruder başlığı içinde filamentı nozula ilerleten itici dişli, motor, nozul sıcaklık sensorü, fanlar, ısıtıcı ve erimiş malzemeyi akıtacak 0,4 mm çapında nozul bulunmakta ve Şekil 2.4’de Creator 3 serinin ekstruder başlığı görseli verilmiştir.



Şekil 2.4: Creator 3 ekstrüder başlığı.

3B yazılarda baskı sırasında, nozulda tıkanma meydana gelebilir. Nadir olsa da filamentin içinde bazen nozul çapından daha büyük toz partikülleri olabilir ve üretim sırasında bu toz partikülleri nozuldan geçemediğinden dolayı nozul tıkanır. Nozul tıkanmasının bir diğer sebebi ise yazıcının yeterli sıcaklıkla çalışmamasıdır. Tıkanan

nozullar temizlenir ve yeniden kullanılır veya yeni nozulla değiştirilip kullanılır. İtici dişlinin bağlanmış olduğu motor yardımıyla filament nozula doğru itilir Şekil 2.5'te itici motoru ve nozul tipleri verilmiştir. Zaman zaman itici dişliyi söküp temizlenmelidir. Nozul tıkanmış zaman veya filament çapı 1,75mm'den küçük geldiği zaman itici filamenti tam olarak itemez. Bu durumda dişlinin diş boşlukları filamentle dolar düzleşir filamenti itemez hale gelir.



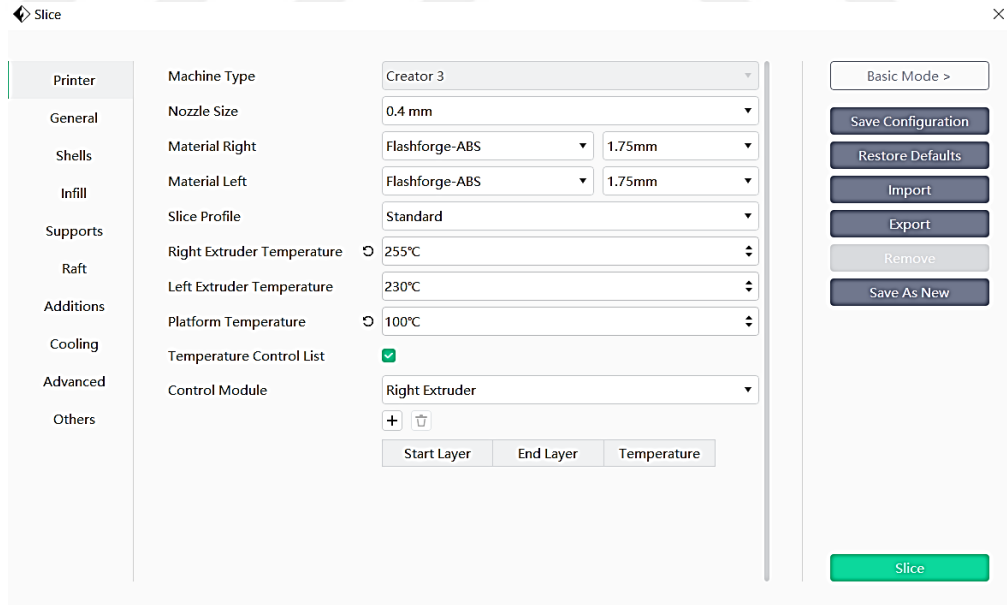
Şekil 2.5: Creator 3 itici motoru, dişli ve nozul tipleri.

Çalışmada kullanılan deney numuneleri Solidworks bilgisayar destekli tasarım (CAD) programında ASTM standart ölçülerine göre çizilip, daha sonra 3B yazıcı dilimleme işlem yapılabilmesi için STL formatına çevirilmiştir. Hazır olan STL dosyasını Creator 3 3B yazıcıyla uyumlu olarak kullanılan FlashPrint 5 dilimleme programı kullanılarak dilimleme işlemi yapılmıştır ve Şekil 2.6'da Flashprint dilimleme programının görüntüsü verilmiştir. Dilimleme işlemi yapılarak 3B yazıcının üretim kodu olan G kodlarına dönüştürülmüştür. G kod dönüşümü, STL dosyasındaki modeli 3B yazıcı üretimine uygun şekilde katmanlar haline dilimlemek demektir (Şahin ve Turan, 2018).

Flashprint 5 dilimleme programı çalıştırıldığı zaman karşımıza sol tarafta baskı, genel, duvarlar, doluluk, destekler, raft vs düzenleme ekranı çıkar. Üretilcek olan parçaya göre, her bir bölümde gerekli olan ayarlar seçilerek G kodu oluşturulup üretime başlanır. Baskı seçeneklerinden nozul çapı, malzeme, sağ-sol nozul sıcaklık ayarları,

tablanın sıcaklığı değerleri üretmek istediğimiz parçaya uygun şekilde seçilip buradan girilir.

Genel kısmın içeriğinde katman kalınlığı seçilirken, ilk katman kalınlığı yani tablada ilk oluşturulacak katman kalınlığı ayrıca belirlenip sonraki (ikinci) katmandan baskı bitene kadarki katman kalınlığı ayrıca belirlenir. Genel bölümü içerisindeki diğer seçenekler ise nozulun boşta hareket hızı, nozulun maksimum ve minimum hareket hızı, nozulun baskı esnasındaki hareket hızı, ilk katman baskı hızıdır. Creator 3’de iki tane ekstrüder kafa bulunduğundan dolayı sağ ve sol nozulların hareket hızların birbirinden bağımsız şeklinde ayrı ayrı girilme imkanı bulunmaktadır. Shell bölümünde ise dış duvarın kalınlığı ve kaç tur dış duvar yapılacağı seçilmektedir. Doluluk bölümünde ise üst katman, alt katman, doluluk oranı ayarlanabilir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi dilimleme yaparken üst katman sayısı, dış duvar sayısı, doluluk oranı ve desen tipleri üretim parametre değerlerine göre girilerek dilimleme işlemi yapılır. Dış duvar sayısına göre dış duvar kalınlıkları değişmekte olup, tezde kullanılan dış duvar sayısı ve kalınlıkları ile bilgi Tablo 2.2’de verilmiştir.

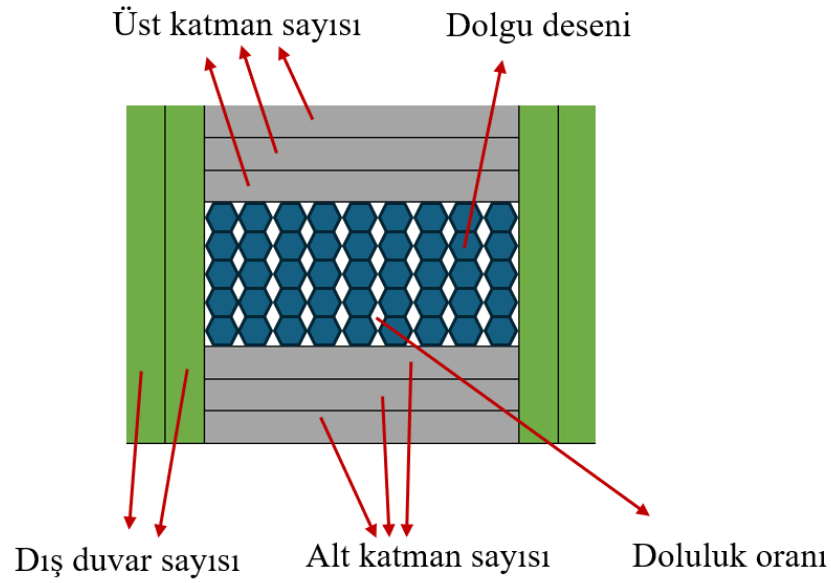


Şekil 2.6: Flahsprint 5 dilimleme programı ekran görüntüsü.

Tablo 2.2: Dış duvar sayısı ve kalınlıkları.

Dış duvar tur sayısı	Kalınlığı (mm)
1	0,40
5	2
7	2,8
9	3,6

Doluluk oran 0-100 arasında tamamen boşluktan tamamen yüzde yüz doluluğa kadar isteğe bağlı olarak diğer girilir. Desen tipleri ise Doğrusal, Bal Peteği, Üçgen ve Gyro şeklinde desenlerden seçim yapılabilir.



Şekil 2.7: Dilimlenmiş parçanın bölümleri.

2.3. Test Numunelerinin Üretilmesi

Bu tez çalışmasında kullanılan test numuneleri Esun, PA66-20KE kompozit filamentle üretilmiştir. Filamentin ana matrisi poliamid66 olmak üzere, %20 karbon elyaf takviyelidir. Ana matris olan PA66 havadaki nemleri kendine emme özelliği bulunduğundan dolayı numune üretim aşamasında, filament, kurutucuda kurutulmuştur. Üretilen çekme test numuneleri ASTM D638 tip 1 standardına, üç

nokta eğme test numuneleri ASTM D790 standardına, basma test numuneleri ASTM D695 standardına ve darbe izod test numuneleri ise ASTM D256 standardına uygun ölçülerde tasarlanıp üretilmiştir. Tablo 2.3’de numune üretiminde kullanılan sabit verileri verilmiştir.

Tablo 2.3: Numune üretiminde kullanılan sabit veriler.

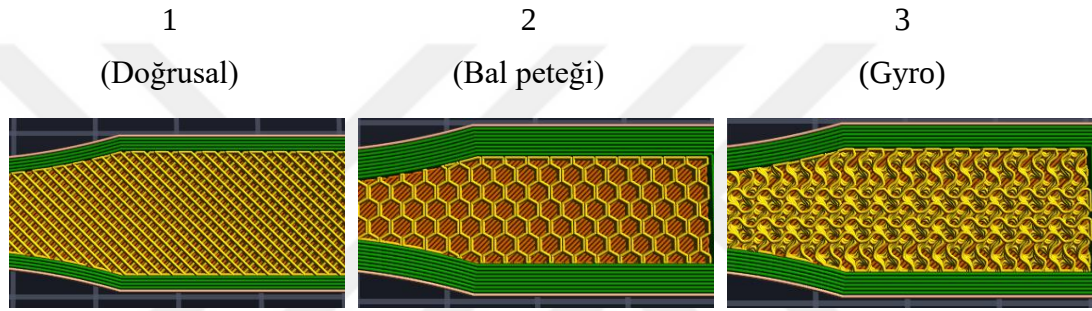
Parametreler	Veriler
Nozul çapı	0,4 (mm)
Üst katman sayısı (kalınlığı)	3 (0,75 mm)
Alt katman sayısı (kalınlığı)	3 (0,75 mm)
Tablo sıcaklığı	80°C
Katman kalınlığı	0,25 (mm)
İlk katman kalınlığı	0,25 (mm)
Baskı hızı	50 mm/sn
İlk katman baskı hızı	10 mm/sn

Nozul sıcaklığı, dış duvar sayısı, doluluk oranı ve desen tipi parametre olarak seçilmiştir. Her bir parametre için üçer seviye belirlenmiştir. Deney tasarımı Taguchi metodu ile L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur. Fakat her bir deney 3 defa tekrar edilmiştir. Böylece toplamda 27 deney yapılmıştır. Deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 2.4’de, deney seti ise Tablo 2.5’te verilmiştir. Şekil 2.8’de 3 boyutlu yazıcı ile üretilen numunelerde kullanılan farklı desen tiplerinin görseli verilmiştir.

Tablo 2.4: Deney parametreleri ve seviyeleri.

	Nozul Sıcaklığı (°C)	Dış Duvar Sayısı	Doluluk Oranı (%)	Desen Tipi
1. seviye	255	5	40	1 (Doğrusal)
2. seviye	270	7	60	2 (Bal peteği)
3. seviye	285	9	80	3 (Gyro)

PA66-20KE numune üretiminde ESUN firmanın filament kurutucu cihazı kullanılmıştır. Filament kurutucu cihazı kullanma sebebi ise PA66-20KE kompozit filament havadaki nemi emmeye müsait ve filament kutuyu açıldıktan 4-6 saat sonra filament nemlenmeye başlar ve 3 boyutlu yazıcıda baskı sırasında nozul tıkanma, katmanlar arasında boşluklar oluşma veya lifli şeklinde hatalı üretime sebep olmaktadır. Şekil 2.9'da PA66-20KE filamentin nemliyken üretim sırasındaki baskı hataları gösterilmektedir. eBox lite kurutucu cihazı 40-55°C (üç sıcaklık seviyesi), 0-18 arası çalışma saati bulunmaktadır. Şekil 2.10'da kurutma cihazının görünümü verilmiştir. Tablo 2.6'da eBox filament kurutucu cihazın teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.8: Deneylerde kullanılan desen tipleri.



Şekil 2.9: PA66-20KE filament nemli olduğunda oluşan üretim hataları.

Tablo 2.5: Deney tablosu.

Deney No	Nozul Sıcaklığı (°C)	Dış Duvar Sayısı	Doluluk oranı (%)	Desen Tipi
1	255	5	40	1
2	255	5	40	1
3	255	5	40	1
4	255	7	60	2
5	255	7	60	2
6	255	7	60	2
7	255	9	80	3
8	255	9	80	3
9	255	9	80	3
10	270	5	60	3
11	270	5	60	3
12	270	5	60	3
13	270	7	80	1
14	270	7	80	1
15	270	7	80	1
16	270	9	40	2
17	270	9	40	2
18	270	9	40	2
19	285	5	80	2
20	285	5	80	2
21	285	5	80	2
22	285	7	40	3
23	285	7	40	3
24	285	7	40	3
25	285	9	60	1
26	285	9	60	1
27	285	9	60	1



Şekil 2.10: Filament kurutma cihazı.

eBox lite filament kurutma cihazı 3 kurutma seviyeden oluşmaktadır ve 3 boyutlu yazıcılarda kullanılan bütün filamentleri kurutmaya uygundur. Tablo 2.7’de sıcaklık seviyeleri ve seviyeler göre hangi filamenti kurutma özellikleri verilmiştir. PA66-20KE kompozit filamentini kurutmak için sıcaklık seviyesi 3’de kurutma işlemi yapılmıştır.

Tablo 2.6: eBox Lite filament kurutucu cihazın özellikleri.

Teknik özellikleri	Değeri
İç sıcaklığı	40°C-118 °C
Sıcak plaka sıcaklığı	105 °C -118 °C
Paket boyutu	249 x 138 x 272,5 (mm)
Ürün boyutu	215 x 104 x 238,5 (mm)
Maksimum kapasitesi	200 x 73 (mm)
Ürün ağırlığı	750 g
Anma gücü	AC100 – 240V – 50/ 60 Hz
Gücü çıkışı	DC24V – 2A
Isıtma gücü	35W
Filament çapı	1,75mm / 2,85mm / 3mm

Tablo 2.7: eBox filament kurutma cihazın sıcaklık seviyeleri.

Filament Tipi	PLA / PLA +	ABS / ABS + / PETG	PVA / PA / PC
Sıcaklık Seviye	1	2	3
İç sıcaklığı	40 °C	50 °C	55 °C

2.4. Ölçme ve Kontrol

Deneyler için üretilen numuneler dijital kumpas yardımıyla ölçülerek olası baskı hatalarına karşı kontroller yapılmıştır. Bu ölçümlerde Mitutoyo markalı, 0,01mm hassasiyetli dijital kumpas kullanılmıştır. Öncelikle dijital kumpas göstergesi kontrol edilerek sıfırlandıktan sonra ölçme işlem yapılmıştır. Üretim toleransı $\pm 0,2$ mm olarak kabul edilmiştir. Üretilen tüm numunelerde bu tolerans baz alınarak ölçme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.11’de 3 nokta eğme numunesi kalınlık ölçümü gösterilmiştir.

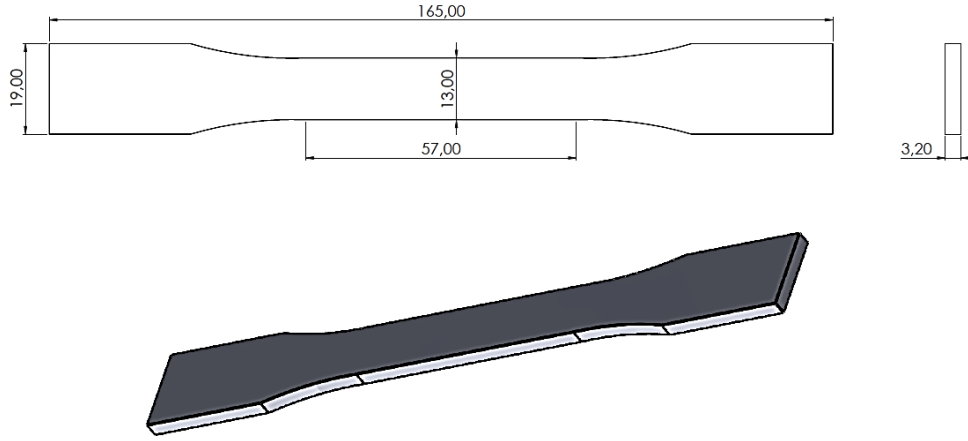


Şekil 2.11: Dijital kumpasla 3 nokta eğme numunesi et kalınlığı kontrolü.

2.5. Çekme Testi

FDM tipi yazıcı kullanılarak ASTM D638 standartlarına uygun şekilde üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri yapılmıştır (American Society for Testing and Materials, 2016). Şekil 2.12’de ASTM D638 standardına uygun şekilde çekme test numune ölçüleri gösterilmektedir. Üretilen 27

adet çekme test numunesi, 9'lu grup olmak üzere üçer tekrar şeklinde, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı bünyesinde bulunan 5 ton kapasiteli Shimadzu marka çekme cihazında, çekme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.12: ASTM D638 çekme test numunesi ölçüleri.



Şekil 2.13: Shimadzu 5 tonluk çekme test cihazı.

Çekme testi esnasında numunelerin ölçüm aralıkları 115 mm olarak ayarlanmıştır. Çekme test numuneleri dik şekilde bağlandıktan sonra, 2 mm/dk çekme hızında

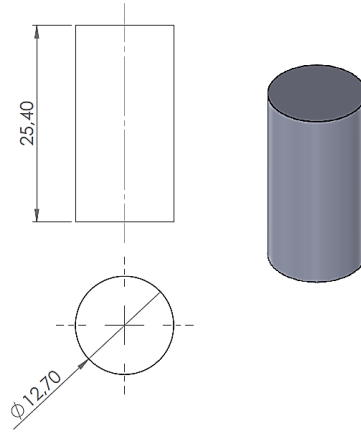
çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı (+20 ~ +30) aralığında tutularak deneyler yapılmıştır. Çekme testi sonrası kopmuş numuneler Şekil 2.14’de verilmiştir.



Şekil 2.14: Çekme test öncesi ve sonrası boy uzama farkı kıyaslama.

2.6. Basma Testi

Bu tez çalışmasında üretilen basma test numunelerinin basma deneyleri ASTM D695 standartlarına uygun olarak yapılmıştır (Sladen ve diğ, 1988). Şekil 2.15’de ASTM D695 basma test numune ölçülerin şematik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.15: ASTM D 695 basma test numunesi ölçüleri.

Farklı nozul sıcaklığı, farklı dış duvar sayısı, farklı doluluk oranı ve farklı desen tipinden oluşan 4 farklı parametreye göre 3 tekrarlı toplamda 27 adet basma test

numuneleri için basma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PA66-20KE kompozit filamentini kullanarak üretilen farklı dış kalınlığa sahip, farklı iç doluluk oranlı ve farklı desen tiplerinden oluşan 12,7 x 12,7 x 25,4 mm boyutlarında üretilen basma test numunelerinin basma deneyleri SHIMADZU 50 kN cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma deneylerinin yapıldığı cihaz Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Tüm testler 2 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır. Tek eksenli basma deneyi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme değerleri Denklem 22.2’de ve Denklem 2.1’de gösterildiği gibi hesaplanarak, basma birim şekil değiştirme ve basma gerilmesi olarak tekrardan düzenlenerek oluşturulmuştur. Elastiklik modülleri (E), basma testi ile elde edilen gerilme ile birim şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal lineer elastik deformasyon bölgesindeki eğimi Denklem 2.3’de gösterildiği gibi hesaplanarak bulunmuştur.

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_b} \quad (2.1)$$

$$e_b = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

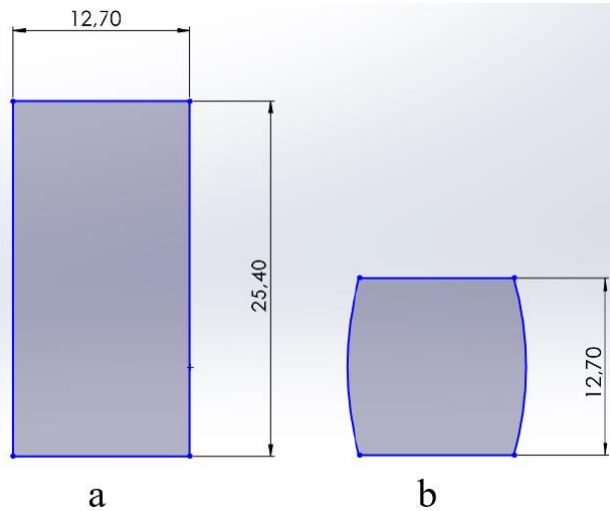
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3)$$

Denklem 2’ de kullanılan σ_b : basma gerilmesi, P_b : Basma yükü, A_b : numunenin kesit alanını ifade edilmektedir. Denklem 3’ de ise e_b : basma birim şekil değişimi, l_1 : numunenin son boyu P_b yük altındaki uzunluğu, l_0 : numunenin orijinal uzunluğu, Δl : numuneye P_b yük uygulaması durumundaki numunenin boyundaki kısalma miktarı olarak tanımlanır. Denklem 4’de E: elastiklik modülü, σ : elastik bölge içerisindeki herhangi bir gerilme değeri ve e : gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değişimi değeri olarak tanımlanır.



Şekil 2.16: Shimadzu 50kN test cihazı.

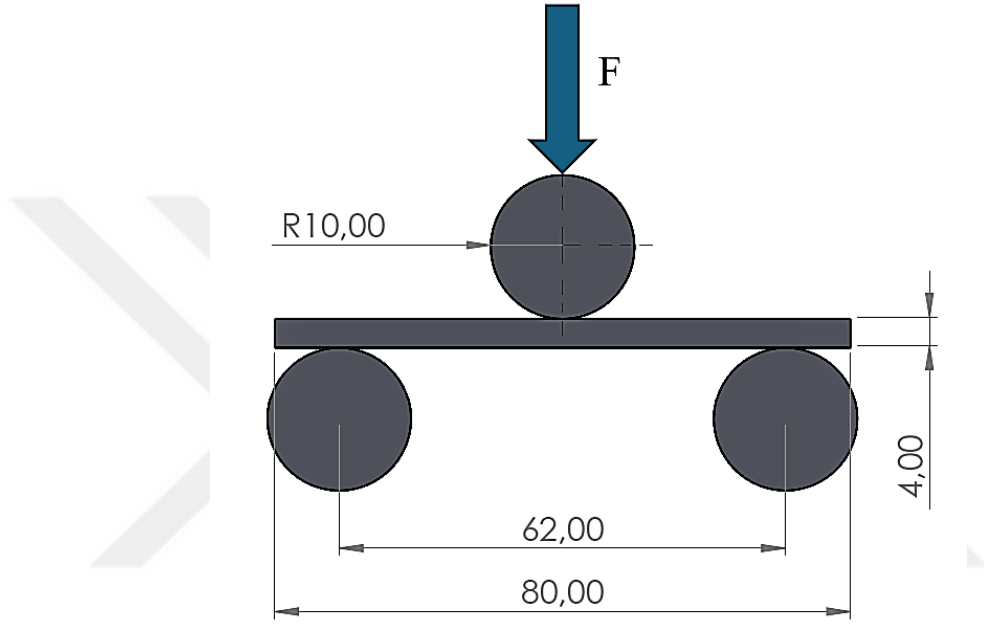
PA66-20KE diğer polimer malzemelerden esnek olduğundan dolayı ABS, PLA, PETG gibi malzemeler gibi kırılma veya çatlak oluşmamaktadır. Bu nedenle basma deneyleri %50 kısalmaya kadar gerçekleştirip durdurulmuştur. Basma deney numune üretimi 1x2 oranlı olduğundan numune boyunu 1x1 oranda durdurulup gerilme, elastiklik modül değerlerini tespit edilmiştir. Şekil 2.17’de basma deney numunesinin ilk boyutu ve %50 boy kısalması sonrası testin durdurulduğu boyutları verilmiştir.



Şekil 2.17: Basma test a) numunenin ilk boyu b) testin durdurulduğu boyu (mm).

2.7. 3 Nokta Eğme Testi

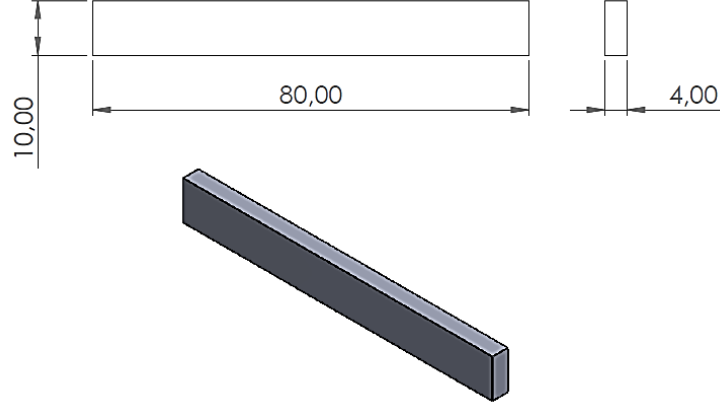
3 nokta eğme testi, numunelerin dayanım ve tasarım özelliklerini tespit etmek ve malzemenin eğilme dayanıma karşı davranışlarını belirlenmek için yapılan testtir. 3 nokta eğme testini iki mesnet üzerinde numunenin ortalanarak konumlandırılmasıyla, numuneye tam ortasından düşey yönde yük uygulanarak gerçekleşir. Düşey yönden uygulanan yük sayesinde numuneler eğilerek kırılmaktadır. Şekil 2.19



Şekil 2.19: Üç nokta eğme testi ölçüleri.

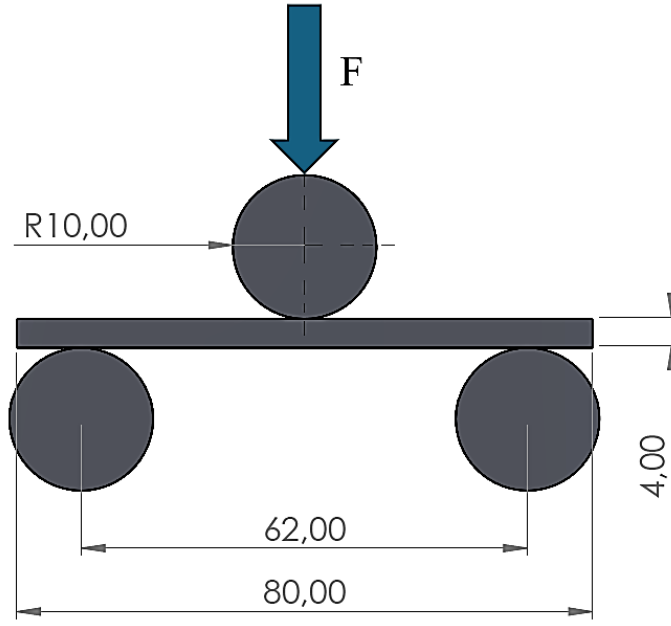
'da gösterildiği gibi F kuvvetinin numuneye dik yönden olması ve numune kırılana kadar eğilme testi sürmektedir. 3 nokta eğme testinde maksimum basma gerilmesi

numunenin üst kısmında oluşmaktadır. Şekil 2.18’de ASTM D790 standart ölçülerine uygun 3 nokta eğme testi numune boyutları görülmektedir.



Şekil 2.18: ASTM D790 3 nokta eğme testi numune ölçüleri.

Test numunelerinde nozul sıcaklığı, dış duvar sayısı, doluluk oranı ve desen tipi gibi 4 faktör her birinde üçer değişken parametrelerine sahip olmak üzere toplamda 9 farklı deney seti oluşturularak üç tekrar şeklinde toplamda 27 adet 3 nokta eğme testi ASTM D790 standartlarına uygun şekilde üretilip deneyler yapılmıştır (Size, 1995). Numuneler yerleştirilirken mesnet eksenler arası mesafesi açıklığı 62 mm olacak şekilde sabitlenerek numunenin merkezine tam dik olarak düşey kuvvet uygulanmıştır. Üç nokta eğme testinde eğme dayanımı ve eğme elastiklik modülü incelenmiştir. Malzemenin esnekliğini eğilme elastiklik modülü göstermektedir. Malzeme esnek ise elastiklik modül değeri de düşmektedir. Şekil 2.19’da 3 nokta eğme numunenin alt destek mesafeleri ve uygulamada kullanılan mesnet çapı ölçülerin gösteren görüntü verilmiştir. Şekil 2.20’de Shimadzu cihazında deney başlangıcı ve deney esnasından görüntüler verilmiştir.



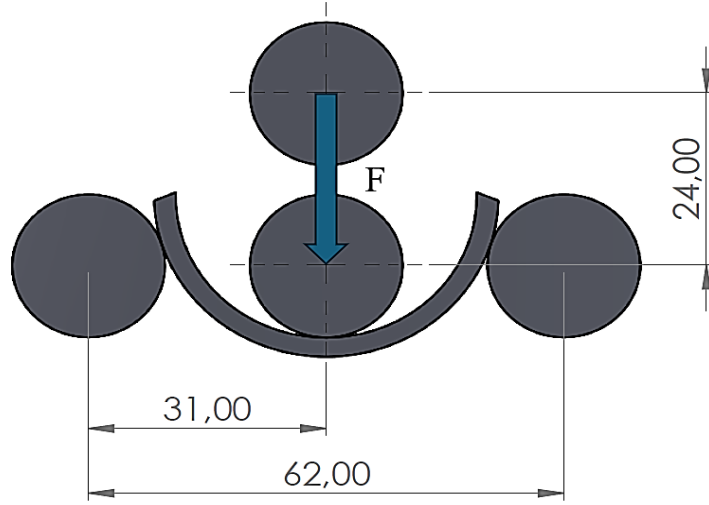
Şekil 2.19: Üç nokta eğme testi ölçüleri.



Şekil 2.20: Üç nokta eğme testinden görüntüler.

3 nokta eğme deney testinde PA66-20KE kompozit malzeme ana matrisi PA66 olmasından dolayı esneklik göstermektedir. Bu malzeme eğme deneyleri esnasında aşırı esneklik göstererek ABS, PLA, PETG vb diğer polimer malzemeler gibi kopmamıştır. Bundan dolayı üst çene alt iki çene ile aynı eksene gelene kadar deney

devam ettirilmiştir. Eksenler çakıştığında deney durdurulmuştur. Şekil 2.21’de deneyin durdurulduğu boyuttaki teknik resmi verilmiştir.



Şekil 2.21: 3 nokta eğme testi tamamlanma süreci.

Eğme testine ait genel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2.4)$$

$$M = F \cdot \frac{L}{4} \quad (2.5)$$

$$c = \frac{h}{2} \quad (2.6)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.8)$$

Sırasıyla ; σ , eğilme gerilmesini; M, maksimum eğme gerilme momentini vermektedir. c, numunenin en dış yüzeyinden olan uzaklık miktarını vermektedir. I, düzlemsel atalet momentini ifade etmektedir. Prizmatik numuneler için eğme gerilmesini (σ_{ϵ}) ilk dört formülden yola çıkarak eğme gerilmesini veren Denklem 2.8 elde edilir. Burada;

F = Uygulanan kuvvet (N),

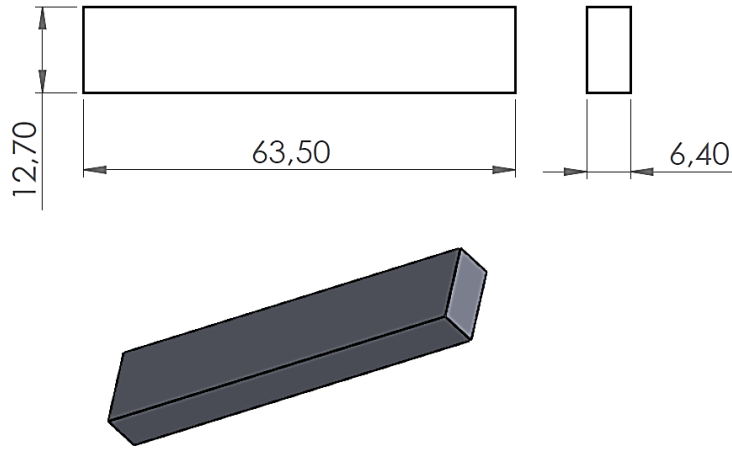
L = Mesnetler arası mesafe (mm),

b = Numunenin genişliği (mm),

h = Numunenin kalınlığı (mm),

2.8. İzod Darbe Testi

İzod darbe testleri ASTM D256 (Ringdal, 2014) standardına uygun ölçülerde üretilen numunelere uygulanmıştır. Numune boyutları Şekil 2.22’de gösterildiği gibi 63,50x12,7x6,4 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Testlerde farklı nozul sıcaklığı, farklı desen tipleri, farklı doluluk oranları ve farklı dış duvar sayısından oluşan 4 ayrı parametreden üçer tekrar şeklinde toplamda 27 adet test numunesi hazırlanmıştır. Deneyler, Sakarya Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Alarge marka darbe cihazında yapılmıştır. Numunelerin darbe dayanımı tespit etmek için, numunelerin üzerine 5,3 kJ’lük sarkacın serbest bırakılmasıyla izod darbe testi yapılmıştır. Test sonuçları kJ/m² birimiyle elde edilmiştir. İzod darbe deneyi sonucunda, PA66-20KE numunelerin birim başına göre darbe direnci değeri tespit edilmiştir. Cihazdan okunan verileri alarak 9 grubun üçerli numunelerden elde edilen sonuçlarının ortalaması hesaplanarak ortalama izod darbe dayanım değerleri bulunmuştur. Şekil 2.23’de izod darbe cihazı ve deney numuneleri verilmiştir.



Şekil 2.22: ASTM D256 standartlarında izod darbe numunesi.



Şekil 2.23: Alarge marka izod darbe cihazı ve deney numuneleri.

2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM analizi, odaklanmış elektron demetinin bir numune yüzeyini tarayıp, o yüzeyden görüntü elde edilmesini, kimyasal bileşimi ve kristal yapısı ve yönelme özelliklerini görmemizi sağlayan bir elektron mikroskop ile görüntüleme çeşididir (C. Wang ve diğ, 2024). İncelenecek olan numune iletken olması, iletken değilse örneğin polimer gibi malzemelerin iletken hale getirilmesi gerekir. Ayrıca numunenin içinin nemli olmaması gerekir ve SEM görüntüsü alınacak numune nemlendiyse poliamid gibi havadaki nemi emmeye müsait malzemeler önce kurutulur sonra iletken hale getirilir. Bu çalışmada, PA66-20KE filamentten üretilen; çekme testi sonrasında en düşük ve en yüksek gerilmelerde kopan numunelerin kopan yüzeylerinin SEM analizi yapılmıştır. SEM analizinde kullanılan cihaz JEOL marka cihaz olup modeli JSM-6060LV'dir. Analiz Sakarya Üniversitesi Metalürji Malzeme Mühendisliği Laboratorunda gerçekleştirilmiştir. SEM cihazı Şekil 2.24'de verilmiştir. Cihaz üç görüntüleme moduna, düşük vakum ve yüksek vakum modlarına sahiptir.



Şekil 2.24: JEOL marka model JSM- 6060LV SEM görüntü cihazı.

2.10. Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)

Yüzey pürüzlülüğü yani üretilen parçanın veya numunenin yüzeyindeki çıkıntılar veya çizikler ürünün yüzey kalitesine doğrudan etkiler. Yüzey pürüzlülüğü üretilen numune veya parçanın sürtünme özellikleri ve aşınma direncini belirler. Yüzey pürüzlülüğü birkaç farklı çeşitte tanımlanır. Bunlardan en çok Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) ve Rz (çizgi aralığı) kullanılmaktadır. Bu tezde yüzey pürüzlülükleri Ra'ya göre incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü yaparken dikkat edilmesi gereken koşullar vardır. Bu temel koşullar: deney yapılırken sıcaklık, havadaki nem ve ölçüm yapılan numuneye titreşim etki etmemelidir. Üretilen her bir numunenin üzerindeki 3 farklı bölgeden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri alınmıştır. Daha sonra bu 3 ölçümün ortalaması hesaplanarak parçanın yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir.



Şekil 2.25: Yüzey pürüzlülüğü cihazı.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mahr, MarSurf PS1 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.25'te yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı verilmiştir.

BÖLÜM 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tezde PA66-KE kompozit filament ile üretilen test numuneler üzerinde, çekme testi, basma testi, 3 nokta eğme testi ve izod darbe testi gibi çeşitli testler gerçekleştirilerek kompozit filamentin mekanik özellikleri incelenmiş; deneyler ve istatistiksel analizlerden elde edilen bulgular kıyaslanarak tartışılmıştır.

Filament ana matrisi poliamid 66'dır. Filamentin içine %20 oranlı kısa karbon elyaf karıştırılmıştır. Kompozit filament kullanarak üretilen numunelerin çekme testi sonrası kopan yüzeylerinden gerekli görülen parametre aralıkları seçilerek SEM analiz sonuçları incelenmiştir.

FDM yönteminde üretim parametrelerinden birisi olan desen tipi yapısı, parça iç yapısının farklı şekillerde oluşturulmasıyla elde edilir. Desen tipi yapısı değişen geometrik şekillere göre doğrudan üretim süresine, numunenin ağırlığına ve mekanik özelliklerine kadar etki etmektedir (Nigam ve Ahirwar, 2023; Sajjad ve diğ, 2023).

Numune baskı hızı 50 mm/dk olmak üzere üretilen bütün numunelerin baskı hızı aynıdır. Filament üreticisinin (Esun) önerdiği nozul sıcaklığı 260 °C-300 °C sıcaklığı aralığında olmasından dolayı bu tezde 255 °C ile 285 °C arasındaki nozul sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir (Speed, 2021).

Numune üretim aşamasında, ana matris olan poliamid 6'nın havadaki nemi emmeye müsait olduğundan filamentin vakumlu ortamda tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde baskı esnasında nozulun tıkanması veya basılan numunelerin eksik veya lifli şeklinde basılması söz konusu olmaktadır. Filamentin nemlenmesini önlemek için filament kurutucu kutusu kullanılmıştır.

3.1. Çekme Testi Bulguları

Numune üretiminden önce PA66-20KE filamentin kendisinden 3 adet çekme test numunesi hazırlanarak çekme özellikleri incelenmiştir. Öncelikle, numune basılmadan önce temin edilen filamentin çekme gerilmesi incelenmiştir. Filamenti direk çekme test cihazının çenesine bağlandığında, bağlanan kısımda ezilme oluşur. Bu da çekme test sonucuna doğrudan etki etmektedir. Bu ezilmeyi önlemek için iç çapı 1,75 mm boşlukta dış çapı 6mm çapında ABS filamentten tutucu üretilip PA66-20KE kompozit filament yapıştırıcı yardımıyla sabitlenmiştir. Şekil 3.1’de filamentin çekme testi için hazırlanmış olduğu görünümü ve çekme test cihazındaki deney sonrası görüntüleri verilmiştir.

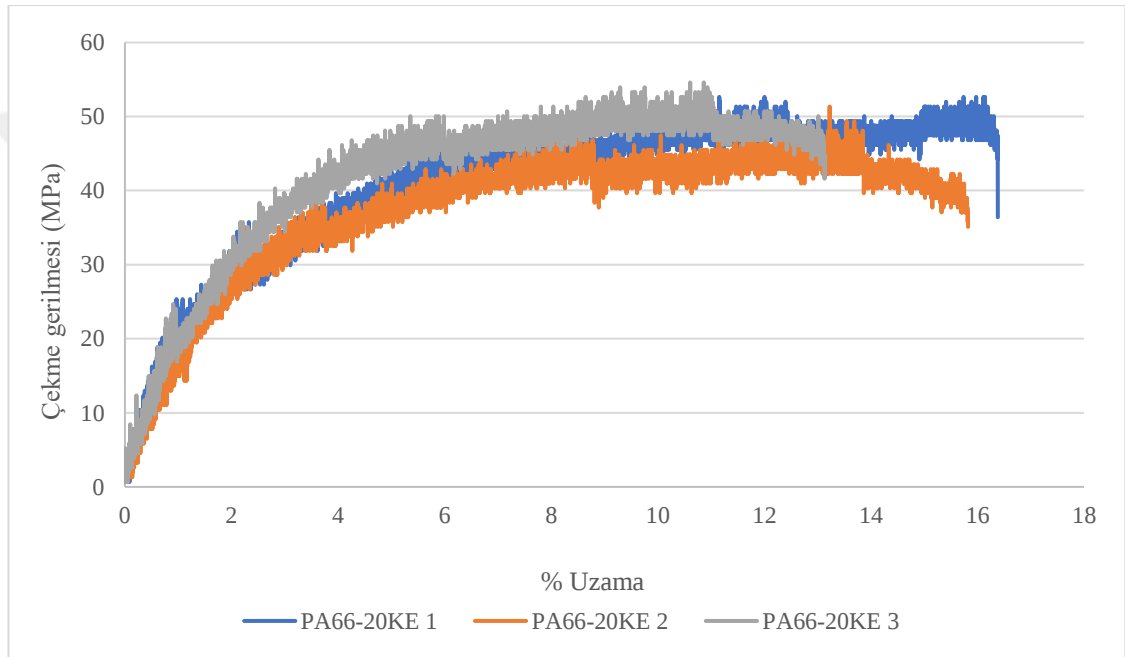


Şekil 3.1: PA66-20KE filamentlere ait çekme testi.

Çapı 1,75mm olan karbon elyaf takviyeli kompozit filamentinden çekme testi için 3 adet numune hazırlanmıştır. Bu 3 tekrarlı çekme testi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafiği Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu çekme testlerinden elde edilen maksimum çekme gerilmesi, % uzama ve elastisite modülleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu deneylerde ortalama çekme gerilmesi değeri 52,863 MPa ve ortalama elastisite modülü değeri 2502,377 MPa olarak elde edilmiştir.

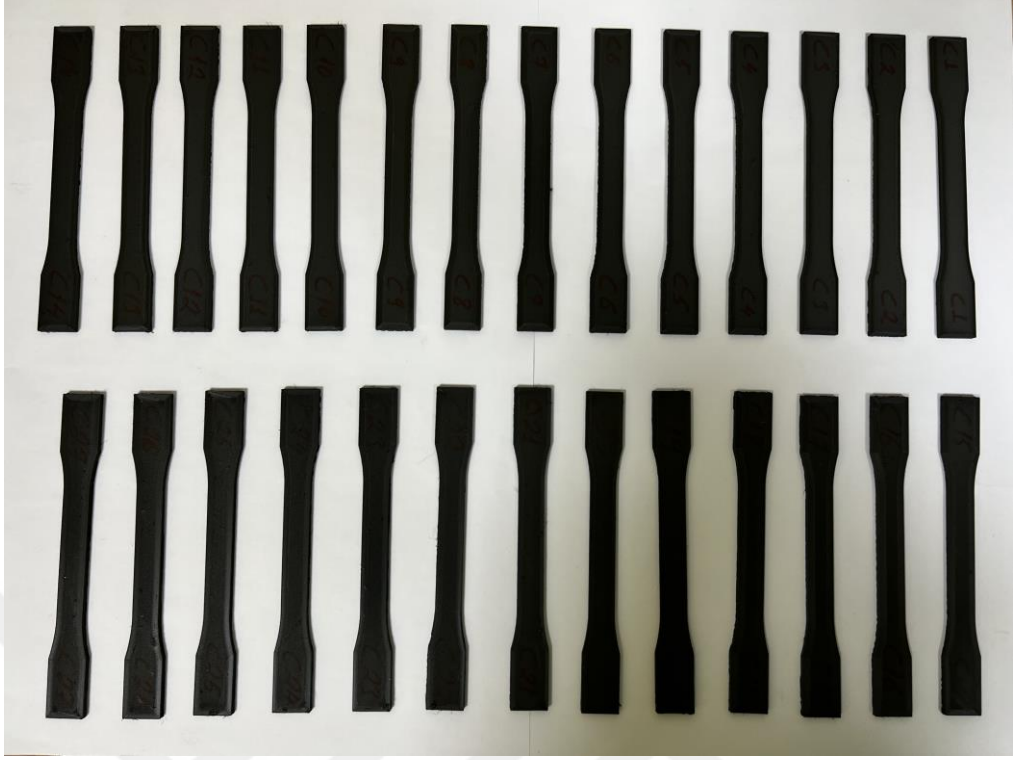
Tablo 3.1: PA66-20KE ham filamentin çekme testi sonuçları.

Numune	Gerilme (MPa)	Uzama (%)	Elastiklik modülü (MPa)
Deney 1	52,646	16,384	2867,310
Deney 2	51,346	15,826	2061,850
Deney 3	54,596	13,143	2577,970
Ortalama	52,863	15,118	2502,377



Şekil 3.2: PA66-20KE filamentin gerilme-% uzama grafiği.

Parçaların çekme testleri için ASTM D638 Type 1 standartlarına göre numuneler üretilmiştir. Taguchi metodu, L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur ve her bir deney 3 defa tekrarlanmıştır. Şekil 3.3'de çekme testi için üretilen numunelerin görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.4'de 2 mm/ dk çekme hızında yapılan çekme test sonrası kopmuş olduğu görsel verilmiştir. Şekil 3.5'de çekme deneyleri sonrası tüm numunelerin test sonrası görselleri verilmiştir.



Şekil 3.3: PA66-20KE kompozit filamentten üretilen çekme test numuneleri.

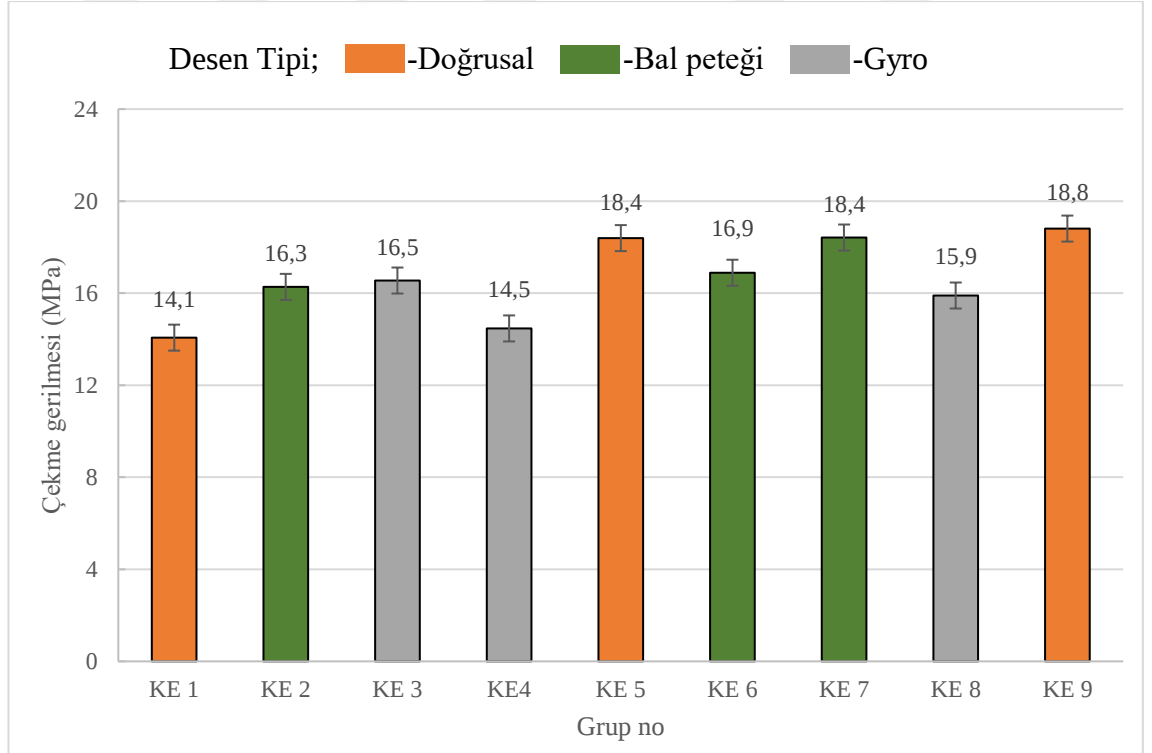


Şekil 3.4: Çekme testinden bir görünüş.



Şekil 3.5: PA66-20KE filament ile üretilen çekme test numunelerin çekme testi sonrası görselleri.

Tablo 3.2’de PA66-20KE çekme test gerilme sonuçların tablosu ektedir. 3 defa tekrar olmak üzere toplamda 27 adet test numunesinin ortalama gerilme dayanım değerini hesaplanarak Şekil 3.6’de gösterilmiştir



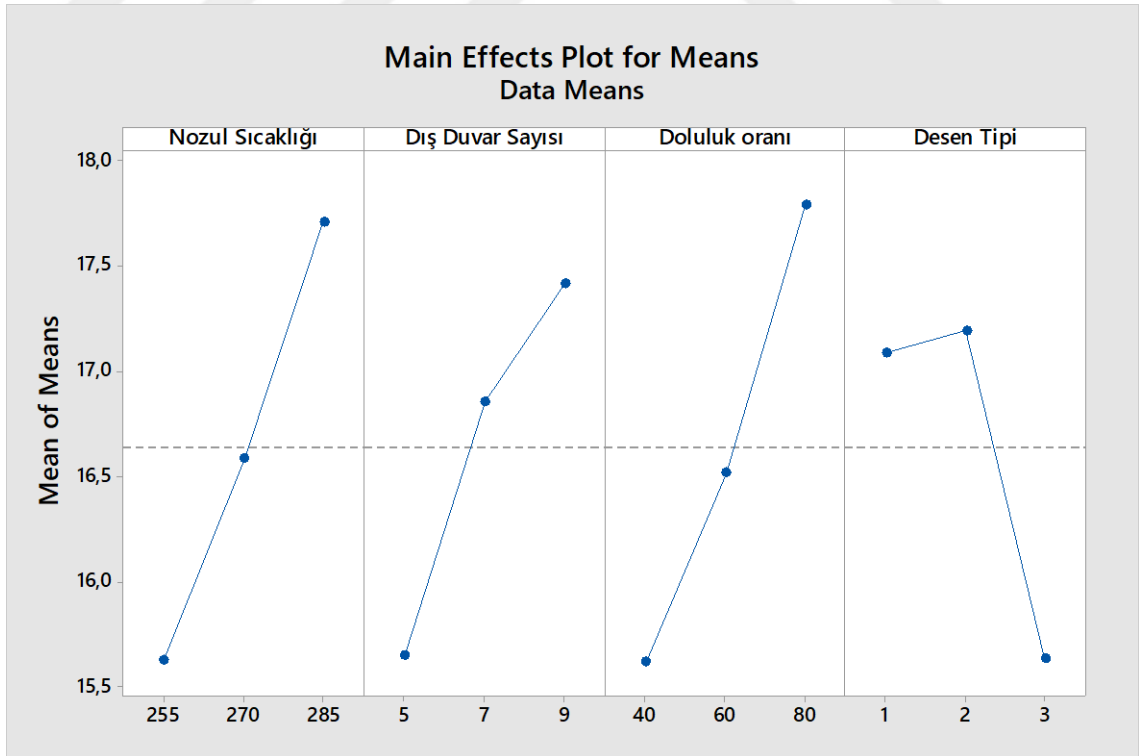
Şekil 3.6: Çekme testi sonuçları.

Tablo 3.2: PA66-20KE çekme test gerilme sonuçları.

Deney Kodu	Deney No	Numune	Max Gerilme (MPa)	Gerilme Ortalaması (MPa)
KE 1	1	KE 1-1	13,503	14,067
	2	KE 1-2	14,218	
	3	KE 1-3	14,481	
KE 2	4	KE 2-1	16,512	16,274
	5	KE 2-2	16,512	
	6	KE 2-3	15,798	
KE 3	7	KE 3-1	17,641	16,550
	8	KE 3-2	15,91	
	9	KE 3-3	16,098	
KE 4	10	KE 4-1	14,443	14,468
	11	KE 4-2	14,556	
	12	KE 4-3	14,406	
KE 5	13	KE 5-1	18,694	18,393
	14	KE 5-2	18,431	
	15	KE 5-3	18,054	
KE 6	16	KE 6-1	17,039	16,888
	17	KE 6-2	17,001	
	18	KE 6-3	16,625	
KE 7	19	KE 7-1	18,242	18,418
	20	KE 7-2	18,506	
	21	KE 7-3	18,506	
KE 8	22	KE 8-1	15,873	15,898
	23	KE 8-2	15,835	
	24	KE 8-3	15,986	
KE 9	25	KE 9-1	19,07	18,807
	26	KE 9-2	19,108	
	27	KE 9-3	18,242	

Çekme testi sonucunda ortalama gerilme dayanımı değeri 16,640 MPa olarak bulunmuştur. Minimum gerilme dayanımı ise deney kodu 1’de (KE 1) 14,067 MPa, maksimum gerilme dayanım deney kodu 9’da (KE 9) 18,807 MPa olarak elde edilmiştir. Maksimum gerilme dayanımı deney kodu 9’da (KE 9) üretim parametreleri ise; 285°C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %60 ve desen tipi Doğrusal olarak elde edilmiştir. Deney kodu 1 minimum sonuç olan üretim parametreleri nozul sıcaklığı 255°C, dış duvar sayısı 5 ve doluluk oranı %40 olarak en düşük seviyesini vermiştir. Deney kodu 1 ile diğer numunelerle kıyaslanırsa diğer numunelerin gerilmelerindeki yüzde artış sırasıyla %16, %18, %3, %31, %20, %31, %13 ve %34 olarak artış gözükmektedir. Maksimum gerilme değeri olan deney kodu 9 grubunda %34 olarak artış sağlanmıştır.

Numune üretiminde kullanılan 4 parametrenin her biri 3 seviyeli ve çekme testine hangi parametrenin hangi seviyesinin ne kadar etki ettiğini net olarak görmek için elde edilen sonuçları Minitab program ile optimizasyon gerçekleştirip Şekil 3.7’de elde edilen deney sonuçlarına göre Sinyal/Gürültü analiz grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7: Çekme testi S/N grafiği.

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi çekme dayanımına en çok etki eden parametreler sırasıyla doluluk oranı (%80, %60, %40), nozul sıcaklığı (285°C, 270 °C, 255 °C), dış duvar sayısı (9, 7, 5) ve desen tipi (2, 1, 3) olarak sıralanmıştır. Literatürde KE-PLA kompozit filament ile doluluk oranı %50-%90 ile üretilen çekme test numunelerinde çekme dayanımı 30-49 MPa bulunmuştur. Doluluk oranı arttıkça çekme dayanımında artış olduğunu belirtmiştir (J. Singh ve diğ, 2023). Şekil 3.7’ye göre çekme deneyi için optimum parametre seviyeleri şöyledir: nozul sıcaklığı 285 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %80, desen tipi 1’dir.

Tablo 3.3’de çekme testi için varyans analizi tablosunda görülen P değeri %5’den küçük olduğundan hepsi anlamlı etkiye sahiptir. P değeri en az olan parametre daha anlamlı etkiye sahiptir. Bu durumda çekme dayanımı üzerindeki en etkili parametre Doluluk oranıdır. Ayrıca yapılan regresyon analizi ile çekme dayanımını veren formül elde edilmiştir. Bu formül Denklem 3.1’de verilmiştir ve bu formülün doğruluk oranı %94,81’dir.

Tablo 3.3: Çekme testi için varyans analizi tablosu.

Kaynak	DF	Standart Sapma	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	6	68,8017	%94,81	68,8017	11,4670	60,84	0,000000000009
Nozul Sıcaklığı	1	19,4168	%26,76	19,4168	19,4168	103,01	0,000000002464
Doluluk oranı	1	21,1705	%29,17	21,1705	21,1705	112,32	0,000000001181
Dış Duvar Sayısı	2	14,6192	%20,14	14,6192	7,3096	38,78	0,000000131110
Desen Tipi	2	13,5951	%18,73	13,5951	6,7976	36,06	0,000000232538
Hata	20	3,7698	%5,19	3,7698	0,1885		
Toplam	26	72,5716	%100,00				

$$\sigma = -5,85 + 0,06924 * T + 0,05423 * k + 1,204 * n_7 + 1,764 * n_9 + 0,104 * y_2 - 1,450 * y_3 \quad (3.1)$$

Burada:

T = Nozul sıcaklığı

k = Doluluk Oranı

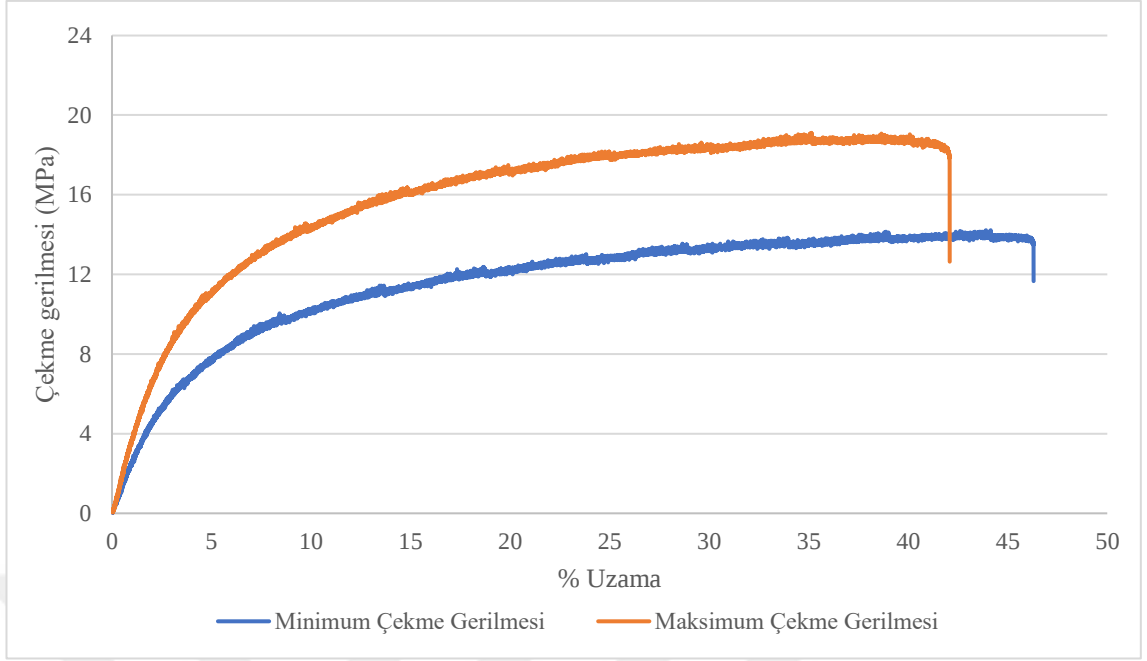
n = Dış Duvar Sayısı

y = Desen Tipi olarak ifade edilmektedir

Doluluk oranı %40 olan 1, 6 ve 8 numaralı deney grubunda gerilme test sonuçları sırasıyla 14,067MPa, 16,888MPa, 15,898MPa olarak elde edilmiştir. Deney Grup 6'nın diğer %40 doluluk oranlı deneylerden öne çıkması dış duvar sayısı 9 olmasıdır. Burada dış duvar sayısının etkisini görmekteyiz.

Numune üretimi esnasında, nozul sıcaklığı minimum ve maksimum nozul sıcaklığına kadar 255°C, 270°C, 285°C olmak üzere üçer grup sonrası atırılmış şeklinde tasarlanmıştır. Nozul sıcaklığı arttıkça gerilme mukavemetinde artış olduğunu tablodan görmekteyiz. Nozul sıcaklığı 255°C minimum gerilme değeri olan deney kod 1'de 14,067 MPa göstermektedir. Bunun sebebi ise katmanlar arası bağ kuvvetli olmamasıdır. 285°C nozul sıcaklığında en yüksek gerilme değeri olan 18,807 MPa görülmüştür. Nozul sıcaklığı ve doluluk oranı arttıkça gerilme gerinim değerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3.8'de PA66-20KE kompozit filamentin en yüksek ve en düşük çekme gerilmesine sahip deney kod 1 ve deney kod 9'un çekme gerilmesi - % uzama grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi PA66-20KE kompozit numunelerin yüzde uzama değerleri farklılık göstermektedir. Çekme gerilme değeri arttıkça % uzama azaldığından malzemenin gerilme değeri arttıkça sünekliği azalır, gevrekleşir ve böylece % uzama değerinin azaldığı görülmektedir.



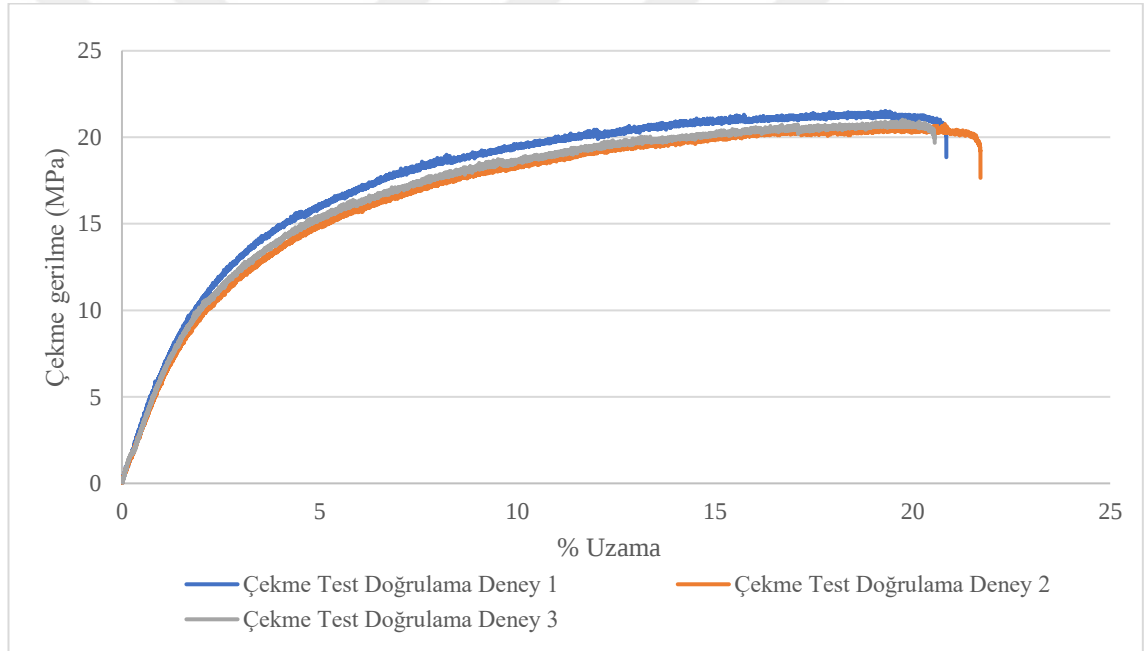
Şekil 3.8: Karbon elyaf takviyeli PA66 kompozitin maksimum ve minimum çekme gerilme grafikleri.

Deney sonuçlarına göre dış duvar sayının etkisi 3. sıradadır. Dış duvar sayısı 5 olan deney parametre grupları 1, 4 ve 7 deney setleridir. Bu deney setlerinde gerilme mukavemetinin değeri sırasıyla 14,07 MPa, 14,468 MPa, 18,418 MPa olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni ise nozul sıcaklığının en yüksek olan 285 °C ve doluluk oranı %80 olan en yüksek 2 parametre bulunmasıdır. Desen tipi en az etki eden parametredir. Doğrusal ve Bal peteği desen tipinde hemen hemen aynı olmakta ve en iyi etki eden desen tipi sırasıyla Bal peteği, Doğrusal ve Gyro olduğunu görmekteyiz.

Yapılan 27 çekme deneyi sonrasında elde edilen verileri optimize ederek parametreler arası en iyi seviye olan nozul sıcaklığı 285 °C, dış duvar sayısı; 9, doluluk oranı %80, desen tipi bal peteği seçilerek tekrardan 3 adet çekme test numunesi üretilip çekme testi (doğrulama deneyi) yapılmıştır. Optimizasyon parametrelerinden oluşan çekme test sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir. Bu test sonucundan ortalama gerilme mukavemeti değeri 21,098 MPa elde edilmiştir. Önceki en iyi gerilme mukavemeti olan 18,807 MPa ile kıyaslanırsa %12 oranlı artış elde edilmiştir. Şekil 3.9'da çekme test için optimum parametreler ile üretilen çekme test sonuçlarının grafiği verilmiştir. Optimum parametreler kullanılarak üretilen üç farklı numunenin çekme testi yapılmıştır. Parametrelerin en iyisi seçilerek çekme test deney yapıldığında çekme dayanım sonuçlarında artış görülmüştür.

Tablo 3.4: Çekme testi optimizasyonu sonrası elde edilen sonuçlar.

Numune	Max çekme gerilmesi (MPa)	% Uzama (%)	Elastiklik modülü (MPa)
Doğrulama Deneyi 1	21,52	20,857	688,04
Doğrulama Deneyi 2	20,76	21,72	632,611
Doğrulama Deneyi 3	21,014	20,564	635,231
Ortalama	21,098	21,047	651,961



Şekil 3.9: Doğrulama deneyi sonuçları

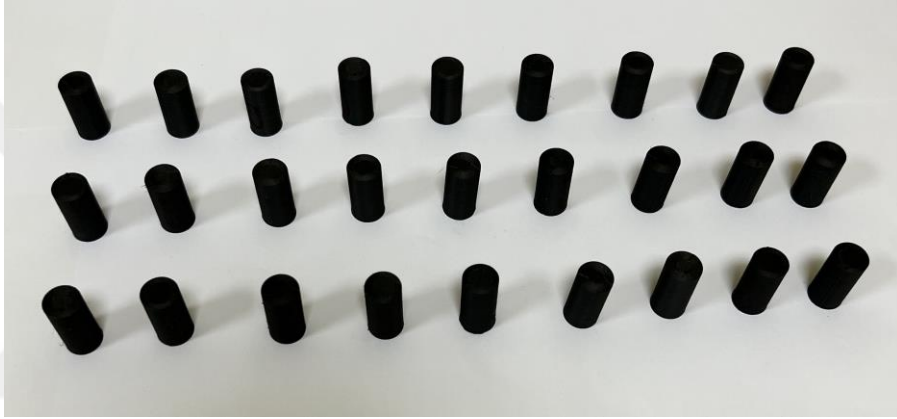
Optimizasyon parametreleri ile üretilen çekme test numunesini L9 ortogonal dizinine göre yapılan deney sonuçları ile kıyaslandığında % uzamalarda azalma ancak çekme gerilmelerinde artış gözlenmiştir. Gerilmedeki bu artış, yapılan optimizasyonun doğruluğunu ortaya koymuştur. PA66-20KE kompozit filament havadaki nemi emme özelliği bulunmaktadır. Numune hazırlandığında numunenin ilk ağırlığı ölçülmüş, sonrasında 10 gün beklenip ağırlık ölçümü yapıldığında elde edilen ağırlık artışı Tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.5: PA66-20KE kompozit filamentin 10 günlük kütle farkı.

Deney Kodu	Deney No	Numune	İlk ağırlığı (gr)	Test öncesi ağırlığı (gr)	Δm (gr)	Δm ortalama (gr)
KE 1	1	KE 1-1	5,592	5,701	0,109	0,119
	2	KE 1-2	5,708	5,832	0,124	
	3	KE 1-3	5,770	5,896	0,126	
KE 2	4	KE 2-1	6,471	6,615	0,144	0,149
	5	KE 2-2	6,557	6,709	0,152	
	6	KE 2-3	6,552	6,702	0,150	
KE 3	7	KE 3-1	6,479	6,629	0,150	0,153
	8	KE 3-2	6,512	6,663	0,151	
	9	KE 3-3	6,480	6,638	0,158	
KE 4	10	KE 4-1	6,289	6,432	0,143	0,144
	11	KE 4-2	6,201	6,346	0,144	
	12	KE 4-3	6,266	6,409	0,143	
KE 5	13	KE 5-1	6,962	7,128	0,166	0,168
	14	KE 5-2	6,941	7,107	0,166	
	15	KE 5-3	6,987	7,157	0,170	
KE 6	16	KE 6-1	6,352	6,499	0,147	0,146
	17	KE 6-2	6,338	6,484	0,146	
	18	KE 6-3	6,310	6,455	0,145	
KE 7	19	KE 7-1	7,450	7,628	0,177	0,183
	20	KE 7-2	7,525	7,715	0,189	
	21	KE 7-3	7,527	7,710	0,183	
KE 8	22	KE 8-1	6,221	6,366	0,145	0,144
	23	KE 8-2	6,275	6,424	0,149	
	24	KE 8-3	6,260	6,399	0,139	
KE 9	25	KE 9-1	7,040	7,209	0,169	0,172
	26	KE 9-2	7,049	7,224	0,176	
	27	KE 9-3	7,012	7,183	0,171	

3.2. Basma Testi

Basma testi için ASTM D695 standartlarına göre numuneler üretilmiştir. Basma test numuneleri için Taguchi metodu, L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur ve her bir deney 3 defa tekrarlanmıştır. Basma testi esnasında kırılma veya çatlama oluşmadığı için numunenin boyutunu %50 orana gelene kadar deneye devam edilmiştir. Şekil 3.10'da basma testi numuneleri ASTM D695 standartlarına uygun şekilde PA66-20KE karbon elyaf karışımı kompozit filament kullanarak üretilmiştir.



Şekil 3.10: Basma testi numuneleri.

Şekil 3.11'da 2 mm/dk çekme hızında yapılan basma testi esnasındaki deneyin durdurulduğu andaki görüntüler verilmiştir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi bazı numunelerin şişmiş şekilde; bazı numunelerin ise aksel olarak kaymış (yamulmuş) durumdayken deneyin sonuçlandığını görmekteyiz. Doluluk oranı düşük olan numunelerde yamulma meydana gelmiştir. Tam tersine doluluk oranı yüksek olan deney gruplarında ise şişme meydana gelmiştir. Deney esnasında yamulma gösteren numunelerde patlama ya da çatlak gibi belirtiler görülmemiştir.

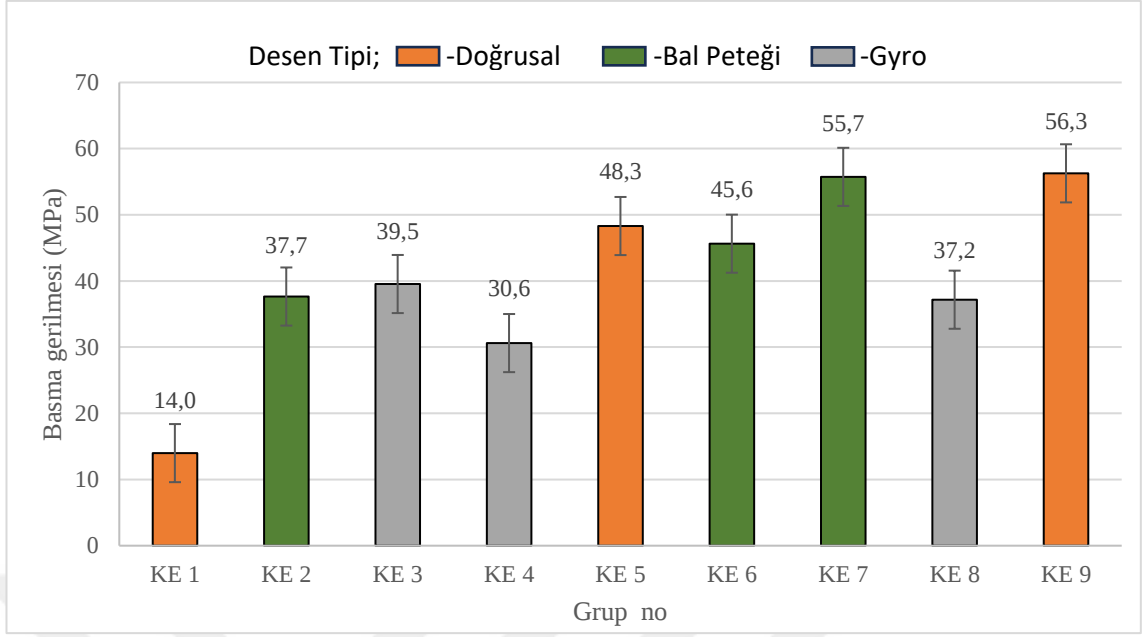


Şekil 3.11: Basma testi esnasındaki görüntüsü.



Şekil 3.12: Basma deneyleri sonrası numune görüntüleri.

Tablo 3.6’da PA66-20KE basma testi sonuçları verilmiştir. 3 tekrarlı olmak üzere toplamda 27 adet test numunesinin ortalama gerilme dayanım değeri hesaplanarak Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

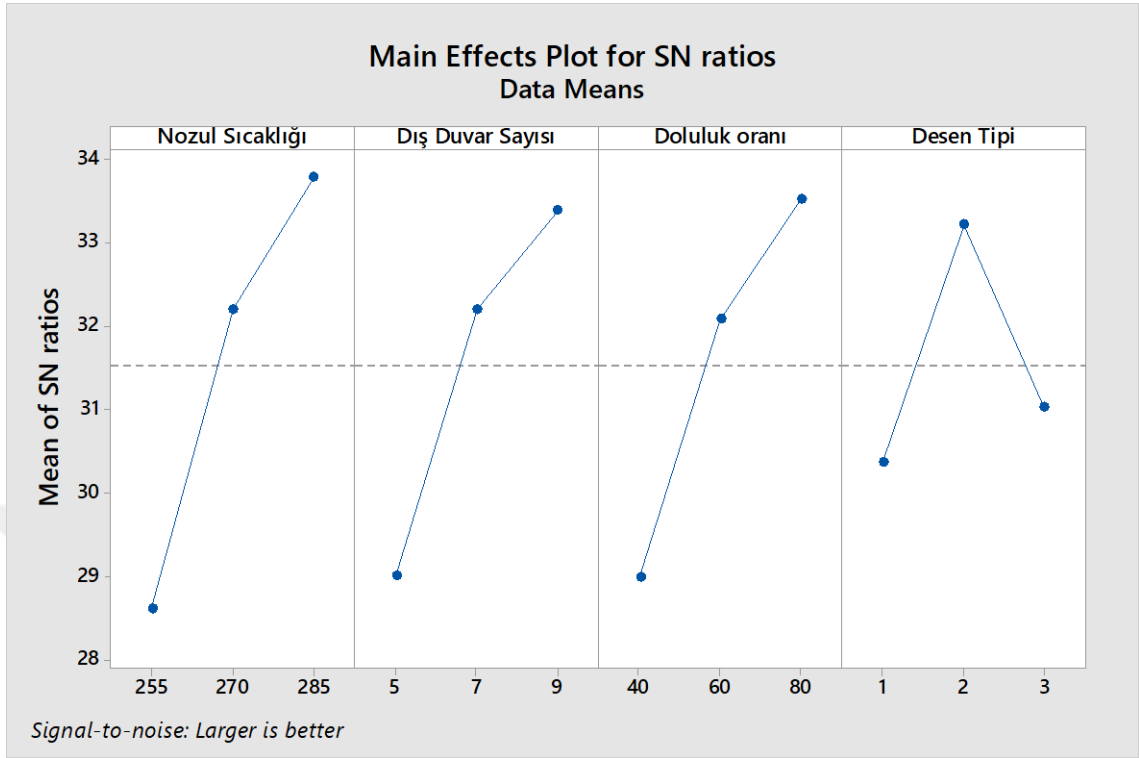


Şekil 3.13: Basma testi sonuçları.

Basma testi sonuçları incelendiğinde en düşük basma gerilmesi olan deney set 1’de 13,990 MPa olarak gözlemlenmiştir. Deney set 1 (KE 1)’in üretim parametreleri nozul sıcaklığı 255°C, doluluk oranı %40 ve desen tipi doğrusal. En yüksek elde edilen basma dayanım değeri deney set 9’un üretim parametresi ise 285 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %60 ve desen tipi doğrusal olmak üzere ortalama basma gerilme değeri 56,270 MPa gerilme değeri elde edilmiştir. Deney set 1 (KE 1) ile diğer deney setleri arasındaki basma gerilmesi farkı yüzde olarak sırasıyla hesaplandığında; %169, %183, %119, %245, %226, %298, %166 ve %302 olarak basma gerilmesi artışı gözlemlenmiştir. Şekil 3.14’de elde edilen deney sonuçlarına göre Sinyal/Gürültü analiz grafiği verilmiştir. Sinyal/Gürültü analiz grafiğinden basma gerilmesine en çok etki eden ilk iki parametrenin nozul sıcaklığı ve doluluk oranı olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu iki parametrenin değerlerinde minimumdan maksimuma gittikçe basma gerilmesinde artış olduğunu net bir şekilde görmekteyiz.

Tablo 3.6: Basma testi gerilme sonuçları.

Deney Kodu	Deney No	Numune	Gerilme (MPa)	Gerilme Ortalaması (MPa)
KE 1	1	KE 1-1	11,563	13,990
	2	KE 1-2	12,118	
	3	KE 1-3	18,289	
KE 2	4	KE 2-1	37,343	37,651
	5	KE 2-2	37,170	
	6	KE 2-3	38,441	
KE 3	7	KE 3-1	39,490	39,544
	8	KE 3-2	40,243	
	9	KE 3-3	38,898	
KE 4	10	KE 4-1	30,235	30,617
	11	KE 4-2	31,037	
	12	KE 4-3	30,580	
KE 5	13	KE 5-1	46,821	48,306
	14	KE 5-2	48,363	
	15	KE 5-3	49,733	
KE 6	16	KE 6-1	45,426	45,640
	17	KE 6-2	45,377	
	18	KE 6-3	46,117	
KE 7	19	KE 7-1	58,174	55,735
	20	KE 7-2	52,769	
	21	KE 7-3	56,261	
KE 8	22	KE 8-1	37,010	37,170
	23	KE 8-2	37,306	
	24	KE 8-3	37,195	
KE 9	25	KE 9-1	57,051	56,270
	26	KE 9-2	56,607	
	27	KE 9-3	55,151	



Şekil 3.14: Basma gerilmesi S/N oranları.

Şekil 3.14’de gösterildiği gibi basma dayanımına en çok etki eden parametreler sırasıyla nozul sıcaklığı (285°C, 270 °C, 255 °C), doluluk oranı (%80, %60, %40), dış duvar sayısı (9, 7, 5) ve desen tipi (2, 3, 1) olarak sıralanmıştır. Tablo 3.7’da basma testi için varyans analizi tablosunda görülen P değeri %5’den küçük olduğundan hepsi anlamlı etkiye sahiptir. P değeri en az olan parametre daha anlamlı etkiye sahiptir. Bu durumda basma testi için nozul sıcaklığı en etkili parametredir. Şekil 3.14’e göre basma deneyi için optimum parametre seviyeleri şöyledir: nozul sıcaklığı 285 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %80, desen tipi 2’dir.

Doluluk oranı %40 olan 1, 6, 8 numaralı deney grubunda gerilme test sonuçları sırasıyla 13,990 MPa, 45,640 MPa, 37,170 MPa olarak elde edilmiştir. Deney Grup 6’nın diğer %40 doluluk oranlı deneylerden öne çıkması dış duvar sayısı 9, nozul sıcaklığı 270°C ve desen tipi bal peteği şeklinde üretilmesi ve optimizasyon sonuçlarına göre en çok etki eden parametreler bulunması etki etmiş olmasıdır.

Tablo 3.7: Basma testi için varyans analizi tablosu.

Kaynak	DF	Standart Sapma	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	6	4140,61	%98,17	4140,61	690,10	179,04	0,0000000000000000
Nozul Sıcaklığı	1	1681,40	%39,87	1681,40	1681,40	436,22	0,0000000000000005
Doluluk oranı	1	1094,36	%25,95	1094,36	1094,36	283,92	0,0000000000000277
Dış Duvar Sayısı	2	848,39	%20,11	848,39	424,19	110,05	0,000000000016082
Desen Tipi	2	516,46	%12,25	516,46	258,23	66,99	0,000000001365776
Hata	20	77,09	%1,83	77,09	3,85		
Toplam	26	4217,70	%100,00				

Yapılan regresyon analizinden basma gerilmesini hesaplamak için %98 doğruluk oranıyla elde edilen formül Denklem 3.2’de verilmiştir.

$$\text{Basma gerilmesi} = -169,94 + 0,6443 * T + 0,3899 * k + 0,0 * n_5 + 7,595 * n_7 + 13,704 * n_9 + 0,0 * y_1 + 6,820 * y_2 - 3,745 * y_3 \quad (3.2)$$

T = Nozul sıcaklığı

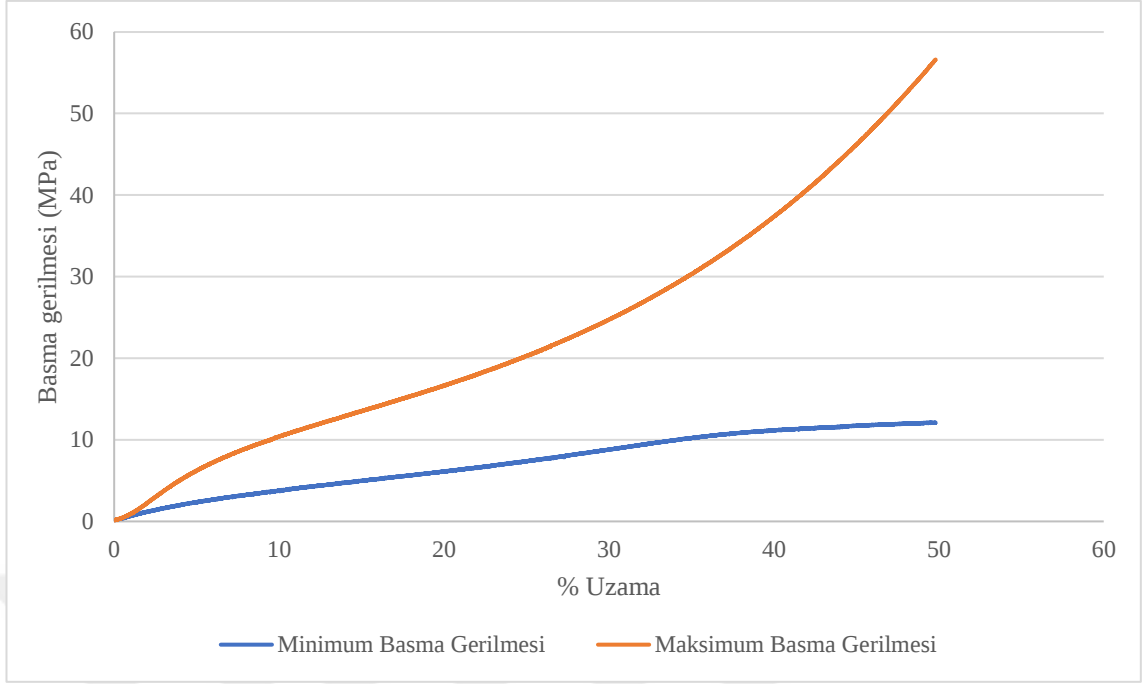
k = Doluluk Oranı

n = Dış Duvar Sayısı

y = Desen Tipi olarak ifade edilmektedir.

Nozul sıcaklığı 255°C minimum gerilme değeri olan 13,990 MPa göstermektedir. Bunun sebebi ise katmanlar arası birbirine iyi bir bağ kuramamasıdır. 285 °C nozul sıcaklığında en yüksek gerilme değeri olan 56,270 MPa görülmüştür.

Maksimum ve minimum basma gerilme grafiği Şekil 3.15’de verilmiştir. Grafikte dörüldüğü gibi maksimum ve minimum basma gerilme farkı görmekteyiz. Burada nozul sıcaklığı, dış duvar sayısı ve doluluk oranı yüksek ise yüzde uzama arttıkça basma gerilme değerinde artış söz gözlemlenmiştir. Nozul sıcaklığı, dış duvar sayısı ve doluluk oranı düşük ise basma gerilme değerinde artış az görüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 3.15: Minimum ve maksimum basma gerilmesi grafiği

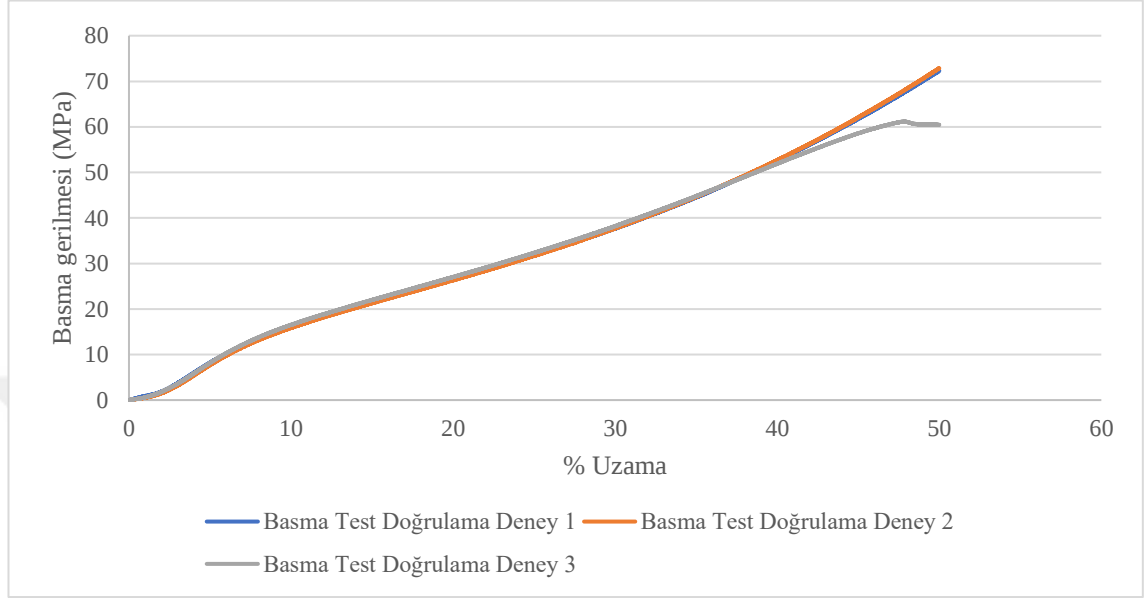
Basma testine göre yapılan S/N analizi sonucunda elde edilen optimum seviyeler: nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı; 9, desen tipi bal peteği doluluk oranı %80 seçilerek tekrardan 3 adet basma test numunesi üretilip doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 3.8’te Optimizasyon parametrelerden oluşan çekme test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.8: En iyi parametre basma gerilmesi sonuçları.

Numune	Max Gerilme MPa	% Uzama %	Elastisite modülü MPa
Doğrulama Deneyi 1	72,317	50	146,846
Doğrulama Deneyi 2	72,885	50	146,974
Doğrulama Deneyi 3	61,173	50	151,539
Ortalama	68,792	50	148,453

Deney seti 9’da en iyi basma gerilme değeri 56,270 MPa iken, optimum parametreler ile üretilen parçada basma gerilme değeri 68,792 MPa oluşmuştur. Böylelikle

optimizasyon doğrulama testinde %22 artış elde edilmiştir. Elde edilen optimum seviyelerle üretilen basma numunesinin basma gerilmesi grafiği Şekil 3.16’da verilmiştir.

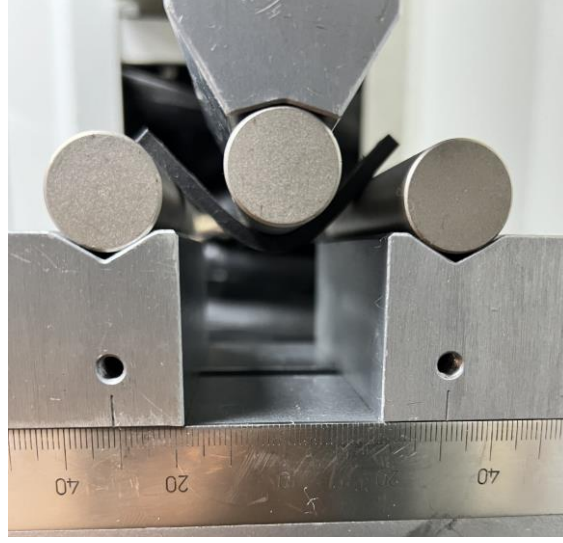


Şekil 3.16: Optimum basma test numunesinin basma gerilmesi grafiği.

3.3. 3 Nokta Eğme Testi

3 nokta eğme test numuneleri ASTM D790 standardına göre üretilmiştir. Taguchi metodu, L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur ve her bir deney 3 defa tekrarlanmıştır.

PA66-20KE kompozit filament kullanıldığı için ana matriste bulunan poliamid parçaya esneklik kazandırmaktadır. Bu nedenle 3 nokta deneyleri esnasında 24 mm çökmeye kadar yapılmıştır. Bu mesafede numunelerde çatlama veya kopma olmamıştır ve tüm deneyler 24 mm eğilmede durdurulup veriler alınmıştır. Şekil 3.17’de eğme test deney görüntüsü verilmiştir. Deney sonrası tüm numunelerin Şekil 3.18’de verilmiştir. Deney sonrası numunelerde kalıcı deformasyon oluşmuştur. Diğer ABS, PLA, PETG gibi filamentlere kıyaslandığında ana matrisi karbon elyaf olan filament üç nokta eğme testinde kırılmamıştır.

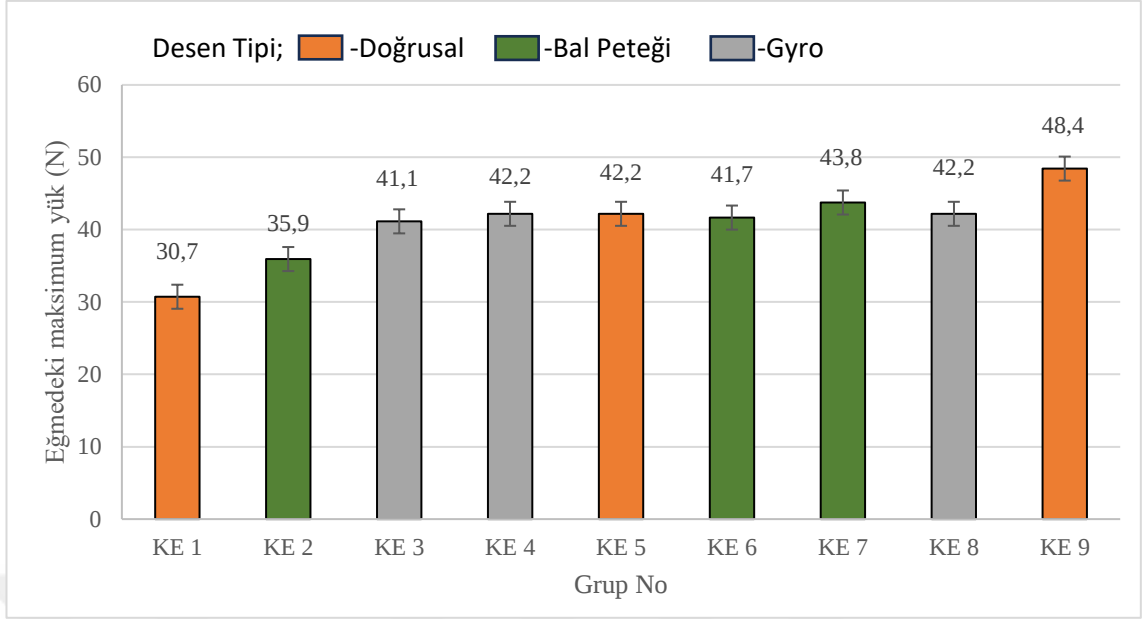


Şekil 3.17: Üç nokta eğme testi görüntüsü.



Şekil 3.18: Üç nokta eğme testi sonrası numune görselleri.

Şekil 3.19’de 3 defa tekrar olmak üzere toplamda 27 adet test numunesinin ortalama yük ve sehime göre ortalama grafikleri verilmiştir.



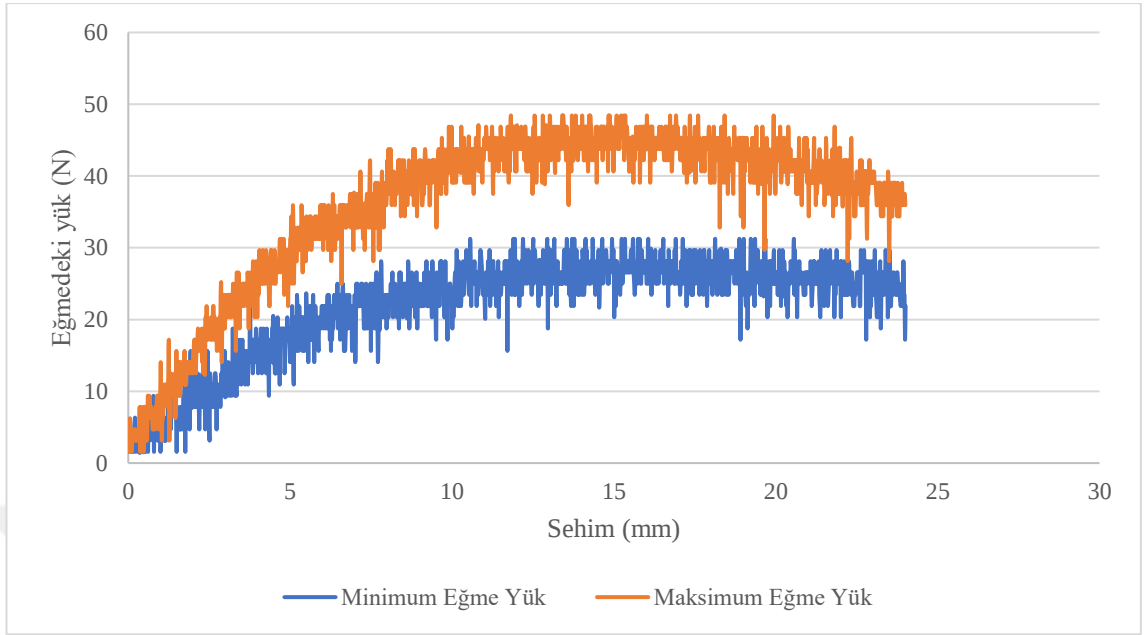
Şekil 3.19: 3 nokta eğme testi.

Tablo 3.9’da PA66-20KE 3 nokta eğme test sonuçları verilmiştir. 3 nokta eğme testi sonucunda ortalama yük değeri 40,914 N olarak bulunmuştur. Minimum yük ise deney kodu 1’de 30,729 N, maksimum yük deney kodu 9’da 48,437 N olarak elde edilmiştir. Maksimum yük elde edilen deney kodu 9’da üretim parametreleri 285 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %60 ve desen tipi doğrusaldır. Minimum sonuç olan deney kodu 1’de üretim parametreleri: nozul sıcaklığı 255°C, dış duvar sayısı 5, doluluk oranı %40 ve desen tipi doğrusaldır. Deney kodu 1 ile diğer numunelerle kıyaslanırsa diğer numunelerin 3 nokta eğme yük farkı yüzde artış sırasıyla %17, %34, %37, %37, %36, %42, %37 ve %58 oranlı artış görülmektedir. Maksimum yük değeri olan deney kodu 9 grubu %58 olarak artış sağlanmıştır.

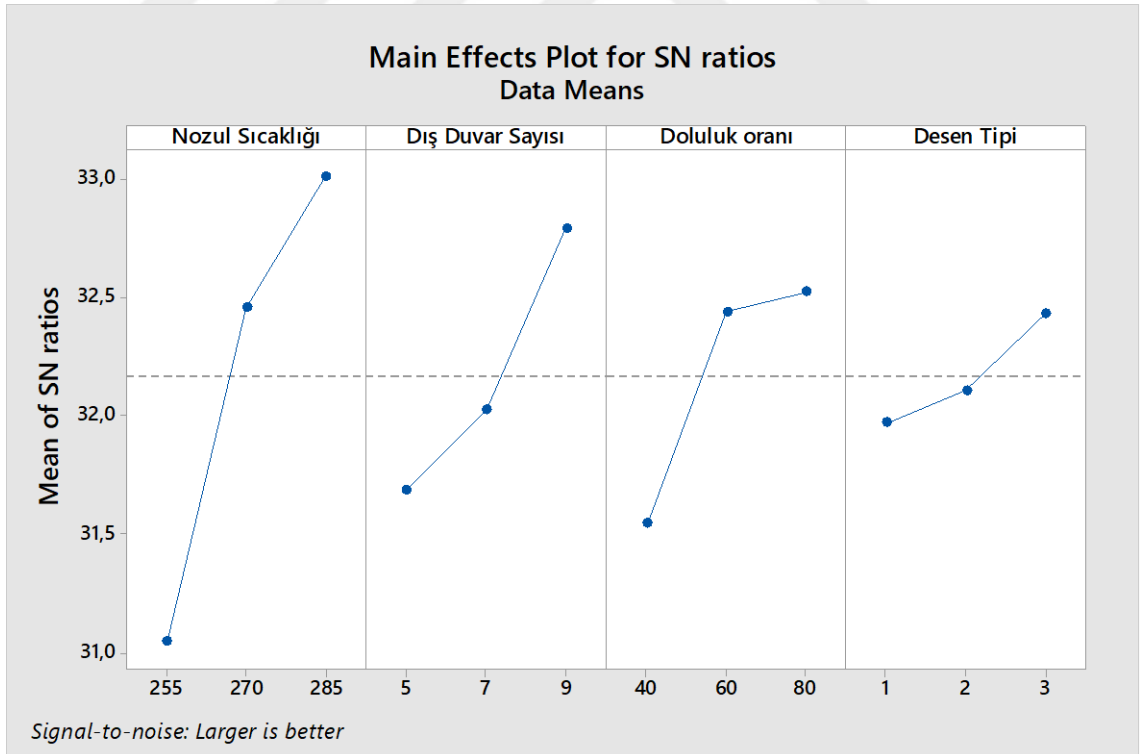
Şekil 3.20’de 3 nokta eğme testinden elde edilen minimum ve maksimum yük ve sehim grafiği verilmiştir. Burada tüm eğme deneylerinde maksimum sehim miktarı 24 mm olarak alındı ve tüm 3 nokta eğme numuneleri eğme test sonucunda kopmamıştır. Şekil 3.21’de Sinyal/Gürültü analiz grafiği verilmiştir.

Tablo 3.9: Üç nokta eğme testinde oluşan yük ve ortalama yük sonuçları.

Deney Kodu	Deney No	Numune	Max Yük (N)	Ortalama Yük (N)
KE 1	1	KE 1-1	29,687	30,729
	2	KE 1-2	31,250	
	3	KE 1-3	31,250	
KE 2	4	KE 2-1	35,937	35,937
	5	KE 2-2	35,937	
	6	KE 2-3	35,937	
KE 3	7	KE 3-1	40,625	41,146
	8	KE 3-2	40,625	
	9	KE 3-3	42,187	
KE 4	10	KE 4-1	42,187	42,187
	11	KE 4-2	42,187	
	12	KE 4-3	42,187	
KE 5	13	KE 5-1	45,312	42,187
	14	KE 5-2	40,625	
	15	KE 5-3	40,625	
KE 6	16	KE 6-1	42,187	41,666
	17	KE 6-2	40,625	
	18	KE 6-3	42,187	
KE 7	19	KE 7-1	43,750	43,750
	20	KE 7-2	43,750	
	21	KE 7-3	43,750	
KE 8	22	KE 8-1	42,187	42,187
	23	KE 8-2	42,187	
	24	KE 8-3	42,187	
KE 9	25	KE 9-1	48,437	48,437
	26	KE 9-2	48,437	
	27	KE 9-3	48,437	



Şekil 3.20: Maksimum ve minimum kuvvet elde edilen deneylerin grafiği.



Şekil 3.21: 3 nokta eğme deneyi S/N grafiği.

Şekil 3.21’de gösterilen Sinyal/Gürültü analize göre en çok etki eden parametreler sırasıyla nozul sıcaklığı (285°C, 270 °C, 255 °C), dış duvar sayısı (9, 7, 5), doluluk oranı (%80, %60 %40) ve desen tipi (3, 2, 1) olarak sıralanmıştır. Şekil 3.21’e göre 3 nokta eğme deneyi için optimum parametre seviyeleri şöyledir: nozul sıcaklığı 285 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %80, desen tipi 3’tür.

Tablo 3.10: Üç nokta eğme testi için varyans analizi tablosu.

Kaynak	DF	Standart Sapma	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	6	557,68	%90,62	557,68	92,947	32,20	0,00000000291
Nozul Sıcaklığı	1	352,78	%57,32	352,78	352,779	122,23	0,00000000057
Doluluk oranı	1	78,13	%12,70	78,13	78,133	27,07	0,00004317469
Dış Duvar Sayısı	2	115,19	%18,72	115,19	57,597	19,96	0,00001718386
Desen Tipi	2	11,57	%1,88	11,57	5,786	2,00	0,16086599812
Hata	20	57,72	%9,38	57,72	2,886		
Toplam	26	615,40	%100,00				

Tablo 3.10’da 3 nokta eğme test için yapılan varyans analizi tablosunda görülen P değerlerinin %5’ten küçük olan nozul sıcaklığı, doluluk oranı ve dış duvar sayısı anlamlı etkiye sahiptir. P değeri en az olan parametre daha anlamlı etkiye sahiptir. Bu durumda üç nokta eğme testi için nozul sıcaklığı en etkili parametredir. Desen tipi %5’ten büyük olduğundan anlamlı etkiye sahip değildir. Ayrıca Minitab programında regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen regresyon eşitliği Denklem 3.3’de verilmiştir. Bu formülün doğruluk oranı %90’dır.

$$\text{Yük} = -47,51 + 0,2951 * T + 0,1042 * k + 0,0 * n_5 + 1,215 * n_7 + 4,861 * n_9 + 1,389 * y_3 \quad (3.3)$$

T = Nozul sıcaklığı

k = Doluluk Oranı

n = Dış Duvar Sayısı

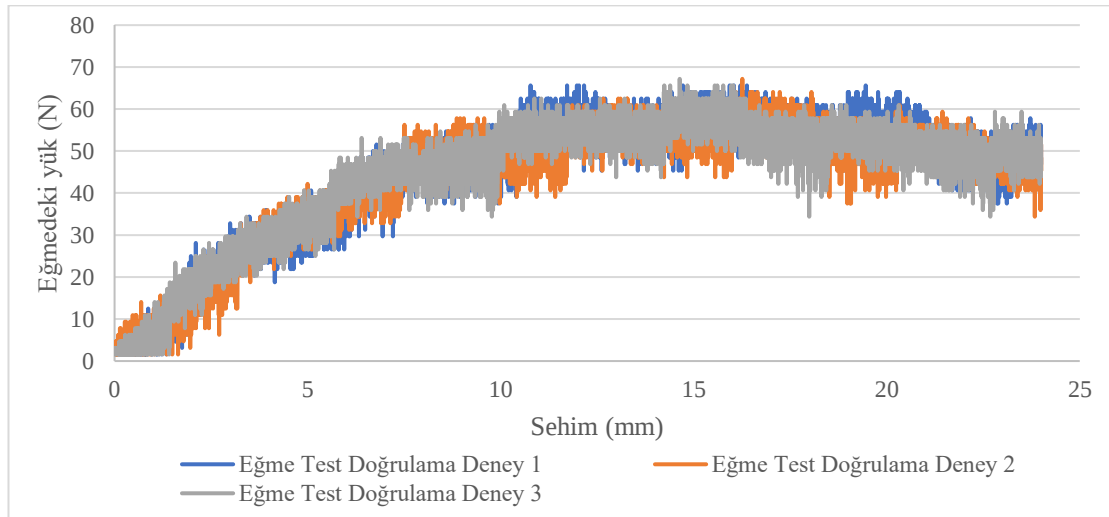
y = Desen tipi olarak ifade edilmektedir

3 nokta eğme testine göre yapılan S/N analizi sonucunda elde edilen optimum seviyeler: nozul sıcaklığı 285 °C, dış duvar sayısı; 9, desen tipi 3 olan Gyro ve doluluk oranı %80 seçilerek tekrardan 3 adet basma test numunesi üretilip doğrulama deneyi yapılmıştır. Tablo 3.11’de optimizasyon parametrelerden oluşan 3 nokta eğme test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.11: Optimizasyon parametrelerden oluşan 3 nokta eğme numunelerin test sonuçları.

Numune	Eğme Mak Yük (N)	Sehim (mm)	Elastiklik modülü (MPa)
Doğrulama Deneyi 1	65,625	24	610,815
Doğrulama Deneyi 2	67,187	24	661,483
Doğrulama Deneyi 3	67,187	24	695,932
Ortalama	66,666	24,000	656,077

Optimum seviyeye göre üretilen numuneye yapılan eğme deneyinde ortalama kuvvet 66,666 N olarak oluşmuştur. Daha önce yapılan 27 adet 3 nokta eğme numunelerin en büyük kuvvet deney set 9’da 48,437 N olarak elde edilmişti. Burada optimum parametre ile kıyaslandığında kuvvetin %38 oranla artış gösterdiğini anlaşılmaktadır. Elde edilen optimum seviyeleri seçilerek üretilen 3 nokta eğme test yük ve sehim grafiği Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22: Üç nokta eğme testi optimizasyonu sonrası elde edilen sonuçlar.

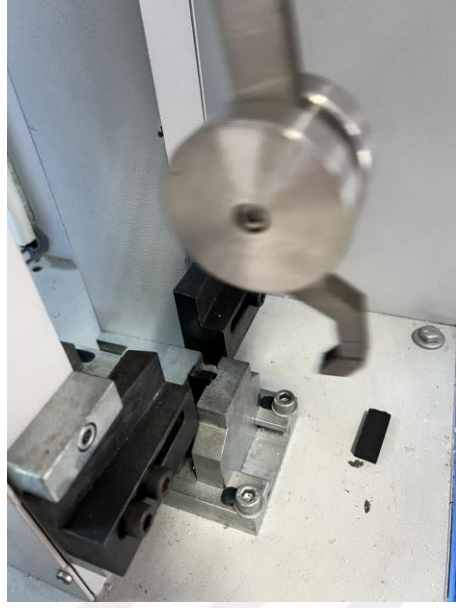
3.4. İzod Darbe Testi

İzod darbe deney seti için ASTM D256 standartlarına uygun şekilde 27 adet deney numunesi üretilmiştir. İzod darbe test numuneleri Taguchi metodu, L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur ve her bir deney 3 defa tekrarlanmıştır. Şekil 3.23’de izod darbe test için üretilen numunelerin görüntüleri verilmiştir. Numunelerin darbe dayanımını tespit etmek için, numunelerin üzerine 5,3 kJ’lük sarkacın serbest bırakılmasıyla izod darbe testi yapılmıştır. Test sonuçları kJ/m² birimiyle elde edilmiştir.

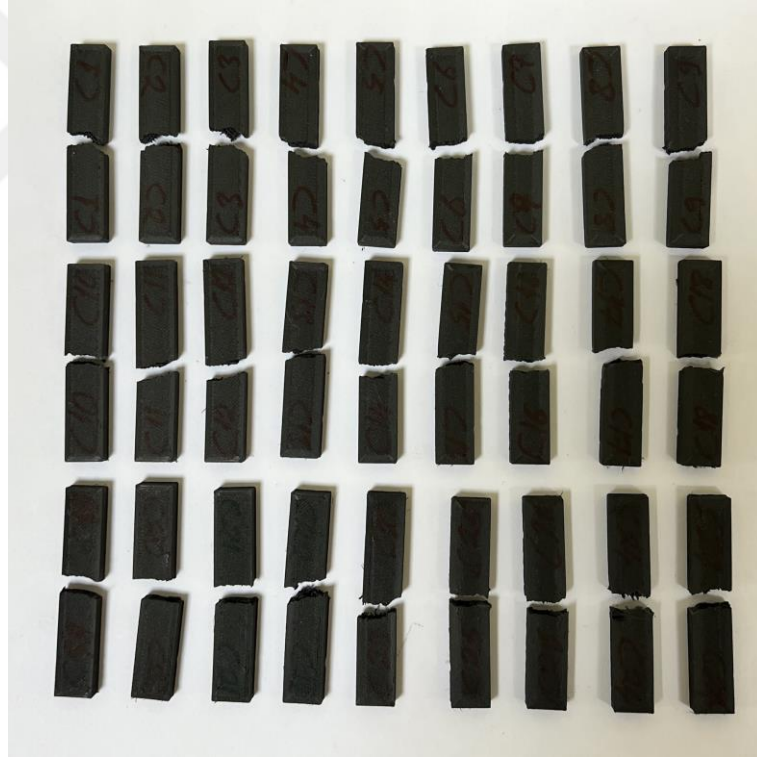


Şekil 3.23: İzod darbe deneyi numuneleri.

Şekil 3.24’de izod darbe deney testi esnasındaki deneyin yapıldığı ana ait görüntü verilmiştir. İzod darbe deney sonrası tüm kırılan numunelerin görüntüsü Şekil 3.25’de verilmiştir.



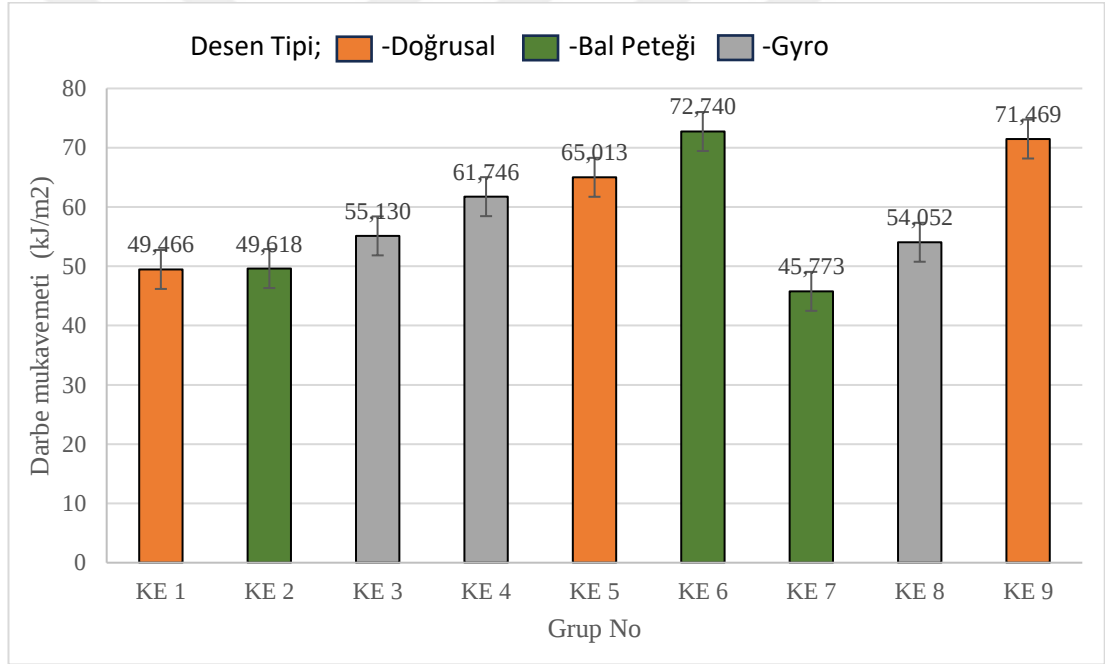
Şekil 3.24: İzod darbe testinin görüntüleri.



Şekil 3.25: İzod darbe deneyi sonrası numune parçaları.

PA66-20KE izod darbe testi sonuçları Tablo 3.12’de verilmiştir. 3 defa tekrar olmak üzere toplamda 27 adet test numunesinin ortalama Re (kJ/m^2) değerleri hesaplanarak Şekil 3.26’da verilmiştir. İzod darbe testi sonucunda ortalama darbe dayanım değeri

58,334 kJ/m² olarak bulunmuştur. Minimum darbe dayanımı 7 numaralı deney grubunda oluşmuştur (45,773 kJ/m²), maksimum darbe dayanımı ise 6 numaralı deney grubunda oluşmuştur (72,740 kJ/m²). Maksimum izod darbe dayanımının elde edildiği 6 numaralı deney grubunda oluşmuştur üretim parametreleri; 270°C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %40 ve desen tipi bal peteğidir. Minimum sonuç olan deney 7’de üretim parametreleri: nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı 5 ve doluluk oranı %80’dir. Deney kodu 7’yi diğer izod darbe dayanım sonuçları ile kıyaslanırsa diğer numunelerin izod darbe dayanım yüzde artış sırasıyla %8, %8, %20, %35, %42, %59, %18 ve %56 olarak artış gözükmemektedir. Maksimum izod darbe dayanım değeri olan deney kodu 6 grubu %59 olarak artış sağlanmıştır.

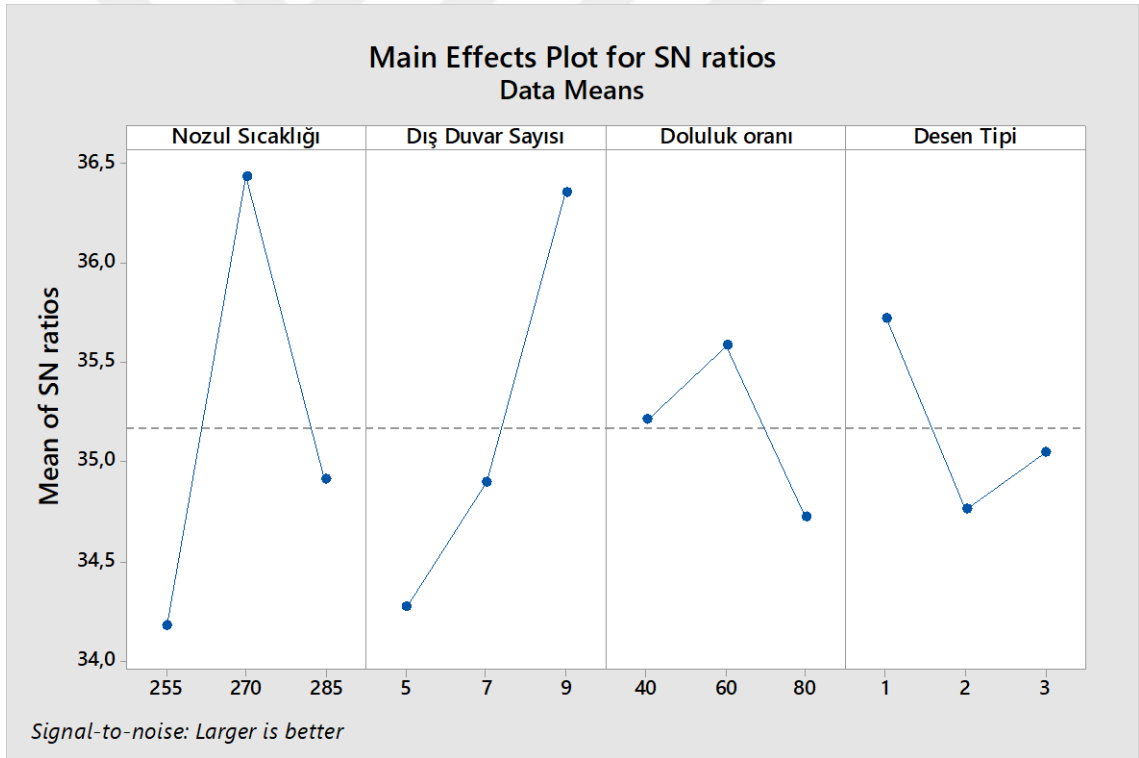


Şekil 3.26: İzod darbe testi sonuçları.

Tablo 3.12: İzod darbe deneyi sonuçları (kJ/m²).

Deney Kodu	Deney No	Numune	Re kJ/m ²	Re ortalaması kJ/m ²
KE 1	1	KE 1-1	49,415	49,466
	2	KE 1-2	52,384	
	3	KE 1-3	46,599	
KE 2	4	KE 2-1	50,697	49,618
	5	KE 2-2	51,122	
	6	KE 2-3	47,035	
KE 3	7	KE 3-1	50,485	55,130
	8	KE 3-2	57,648	
	9	KE 3-3	57,257	
KE 4	10	KE 4-1	63,341	61,746
	11	KE 4-2	60,493	
	12	KE 4-3	61,405	
KE 5	13	KE 5-1	63,681	65,013
	14	KE 5-2	67,338	
	15	KE 5-3	64,019	
KE 6	16	KE 6-1	73,627	72,740
	17	KE 6-2	72,740	
	18	KE 6-3	71,854	
KE 7	19	KE 7-1	41,753	45,773
	20	KE 7-2	45,723	
	21	KE 7-3	49,844	
KE 8	22	KE 8-1	51,122	54,052
	23	KE 8-2	49,629	
	24	KE 8-3	61,405	
KE 9	25	KE 9-1	76,494	71,469
	26	KE 9-2	66,279	
	27	KE 9-3	71,634	

İzod darbe numunelerinin üretiminde kullanılan 4 parametrenin her biri 3 seviyelidir. İzod darbe testine hangi parametrenin hangi seviyesinin ne kadar etki ettiğini net olarak görmek için elde edilen sonuçlara göre Minitab programı ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre Sinyal/Gürültü analiz grafiği Şekil 3.27’de verilmiştir. İzod darbe testinde nozul sıcaklığı 270°C ile üretilen deney set 4, 5 ve 6 da izod darbe sonuçları sırasıyla 61,746 kJ/m², 65,013 kJ/m² ve 72,740 kJ/m² olmak üzere ortalama izod darbe dayanımının 58,334 kJ/m² üstüne çıktığı görülmektedir. Şekil 3.26’da görüldüğü gibi dış duvar sayısının artışı ile izod darbe dayanımında artış oluşmaktadır. Sinyal/Gürültü analizinde görüldüğü gibi izod darbe dayanım için numune üretiminde kullanılan 4 parametre arasından darbe dayanımına en çok etki eden iki parametreler nozul sıcaklığı ile dış duvar sayısıdır.



Şekil 3.27: İzod darbe testi S/N grafiği.

Şekil 3.27’de gösterildiği gibi izod darbe dayanımına en çok etki eden parametreler sırasıyla nozul sıcaklığı (270°C, 285 °C, 255 °C), dış duvar sayısı (9, 7, 5), desen tipi (1, 3, 2) ve doluluk oranı (%60, %40, %80) sonuncu etki eden parametre olarak sıralanmıştır. Tablo 3.13’de izod darbe testi için varyans analizi tablosunda görülen P

değeri %5'den küçük olduğundan dış duvar sayısı anlamlı etkiye sahiptir. P değeri en az olan parametre daha anlamlı etkiye sahiptir. Bu durumda izod darbe testi için dış duvar sayısı en etkili parametredir. Nozul sıcaklığı, doluluk oranı ve desen tipi anlamlı etkiye sahip değildir. Şekil 3.27'ye göre izod darbe deneyi için optimum parametre seviyeleri şöyledir: nozul sıcaklığı 270 °C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %60, desen tipi 1'dir.

Tablo 3.13: İzod darbe testi için varyans analizi tablosu.

Kaynak	DF	Standart Sapma	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	6	1339,80	%52,08	1339,80	223,30	3,6234	0,01348
Nozul Sıcaklığı	1	145,88	%5,67	145,88	145,88	2,3671	0,13959
Doluluk oranı	1	53,49	%2,08	53,49	53,49	0,8679	0,36264
Dış Duvar Sayısı	2	956,83	%37,20	956,83	478,41	7,7631	0,00320
Desen Tipi	2	183,60	%7,14	183,60	91,80	1,4896	0,24942
Hata	20	1232,54	%47,92	1232,54	61,63		
Toplam	26	2572,34	%100,00				

Basma gerilmesini hesaplamak için %52 doğruluk oranıyla elde edilen regresyon eşitliği Denklem 3.4'de verilmiştir.

$$Re = 9,9 + 0,190 * T - 0,0862 * k + 0,0 * n_5 + 3,90 * n_7 + 14,12 * n_9 - 5,94 * y_2 - 5,01 * y_3 \quad (3.4)$$

T = Nozul sıcaklığı

k = Doluluk Oranı

n = Dış Duvar Sayısı

y = Desen Tipi olarak ifade edilmektedir

3.5. Yüzey Pürüzlüğünün İncelemesi

Yüzey pürüzlüğünü incelemek için Taguchi metodu, L9 ortogonal dizinine göre deney seti oluşturulmuştur ve her bir deney 3 defa tekrarlanmıştır. Şekil 3.28’de yüzey pürüzlüğü numunelerinin görüntüsü verilmiştir.

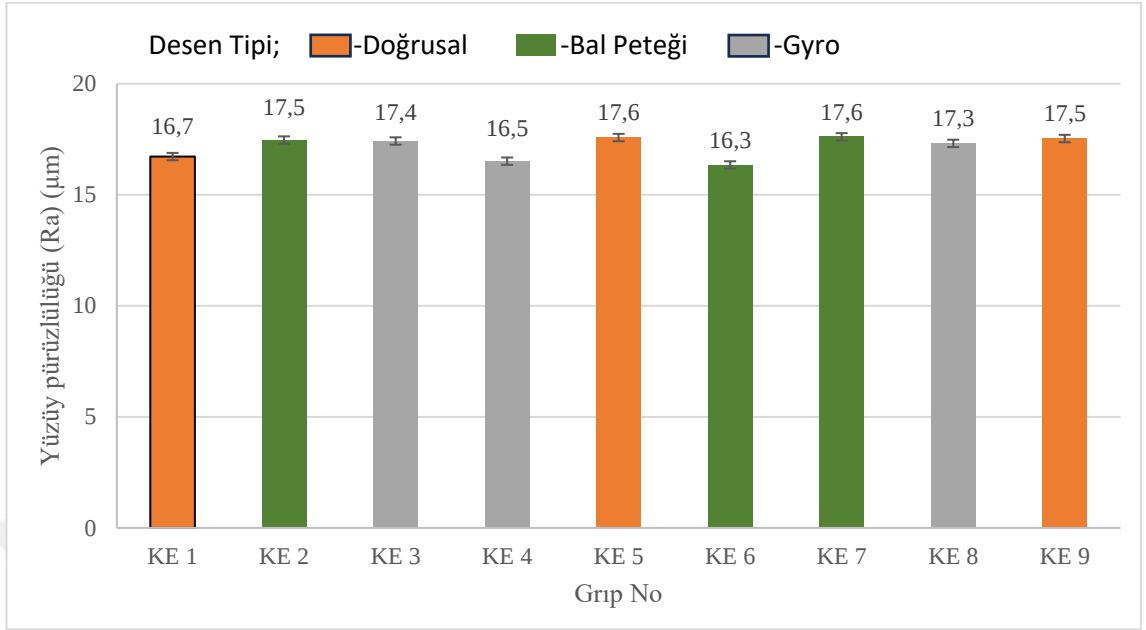


Şekil 3.28: Yüzey pürüzlüğü numuneleri.

Şekil 3.29’da yüzey pürüzlülüğü ölçme işlemi esnasındaki görüntü verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçülürken numunenin sağa-sola veya ileri geri hareket etmemesi ve numunenin ölçüldüğü masada titreşim olmamasına önem verilmelidir. Yüzey pürüzlülüğü ölçerken farklı noktalardan ölçüler alınmıştır. Şekil 3.30’da yüzey pürüzlülüğünün Ra cinsinden ortalama sonuçları verilmiştir. Şekil 3.30’da görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü sonuçları hemen hemen birbirine yakındır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 17,166 μm bulunmuştur. Minimum değer 16,343 μm ile 6 numaralı deney grubunda bulunurken maksimum yüzey pürüzlülüğü 17,610 μm olarak 7 numaralı deney grubunda bulunmuştur.



Şekil 3.29: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.



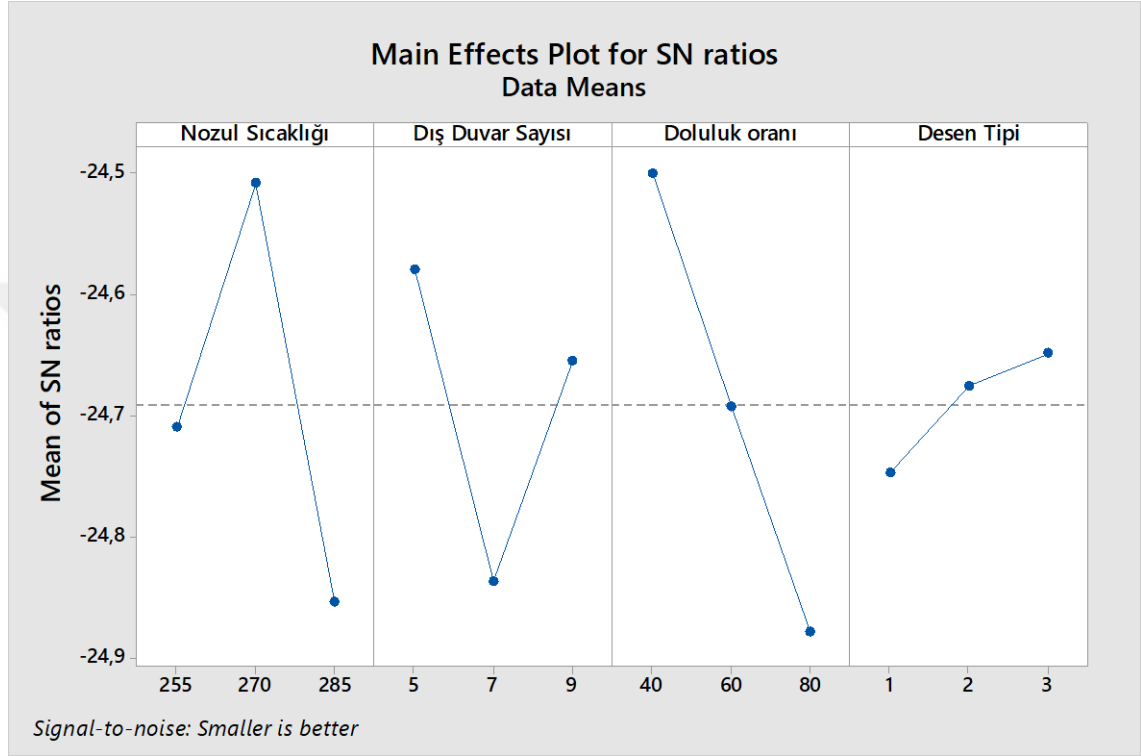
Şekil 3.30: Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ortalamaları.

Tablo 3.14’de yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları verilmiştir. Burada desen tipinin etkisinin az olduğunu; nozul sıcaklığı, doluluk oranı ve dış duvar sayının yüzey pürüzlülüğünü daha çok etkilediği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün minimum değeri daha iyi sonucu bize göstermekte. 270°C’ nozul sıcaklığının kullanıldığı 4, 5 ve 6 numaralı deney gruplarından 4. grupta 16,513 μm; 6. grupta ise 16,343 μm olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmesi nozul sıcaklığının optimum seviyede olduğunu kanıttır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 7. grupta 285°C nozul sıcaklığında 17,610 μm elde edilmiştir.

Tablo 3.14: PA66-20KE yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.

Deney Kodu	Deney No	Numune	Ra (μm)	Ra ortalaması (μm)
KE 1	1	KE 1-1	16,46	16,720
	2	KE 1-2	16,89	
	3	KE 1-3	16,81	
KE 2	4	KE 2-1	17,58	17,463
	5	KE 2-2	17,23	
	6	KE 2-3	17,58	
KE 3	7	KE 3-1	17,28	17,420
	8	KE 3-2	17,54	
	9	KE 3-3	17,44	
KE 4	10	KE 4-1	16,66	16,513
	11	KE 4-2	16,14	
	12	KE 4-3	16,74	
KE 5	13	KE 5-1	17,67	17,577
	14	KE 5-2	17,78	
	15	KE 5-3	17,28	
KE 6	16	KE 6-1	16,45	16,343
	17	KE 6-2	16,5	
	18	KE 6-3	16,08	
KE 7	19	KE 7-1	17,86	17,610
	20	KE 7-2	17,37	
	21	KE 7-3	17,6	
KE 8	22	KE 8-1	17,35	17,313
	23	KE 8-2	17,52	
	24	KE 8-3	17,07	
KE 9	25	KE 9-1	17,63	17,533
	26	KE 9-2	17,7	
	27	KE 9-3	17,27	

Yüzey pürüzlülüğüne hangi parametrenin hangi seviyesinin ne kadar etki ettiğini net olarak görmek için; elde edilen sonuçlara optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.31’de Sinyal/Gürültü analiz grafiği verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğün az olması istendiği için “daha küçük daha iyi” formülasyonu kullanılmıştır.



Şekil 3.31: Yüzey pürüzlülüğü testi S/N grafiği.

Şekil 3.31’de gösterildiği gibi yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametreler sırasıyla doluluk oranı (%40, %60, %80), nozul sıcaklığı (270°C, 255 °C, 285 °C), dış duvar sayısı (5, 9, 7) ve desen tipi (3, 2, 1) olarak sıralanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için en iyi sonuç veren deney set 6’nın üretim parametresi; nozul sıcaklığı 270°C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %40 ve desen tipi bal peteğidir. En düşük sonucu veren deney set 7’nin üretim parametresi ise; nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı 5, doluluk oranı %80 ve desen tipi bal peteğidir. Şekil 3.31’e göre yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre seviyeleri şöyledir: nozul sıcaklığı 270 °C, dış duvar sayısı 5, doluluk oranı %40, desen tipi 3’dür.

Tablo 3.15’de yüzey pürüzlülüğü testi için varyans analizi tablosunda görülen P değeri %5’ten küçük olan parametre anlamlı etkiye sahiptir. Doluluk oranının P değeri

%5'den küçük olduğundan anlamlı etkiye sahiptir. Diğer parametreler ise anlamlı bir etkiye sahip değildir.

Tablo 3.15: Yüzey pürüzlülüğü testi için varyans analizi tablosu.

Kaynak	DF	Standart Sapma	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	5	3,1333	45,17%	3,1333	0,62666	3,45953	0,019498
Nozul Sıcaklığı	1	0,3641	5,25%	0,3641	0,36409	2,00998	0,170935
Doluluk oranı	1	2,4865	35,84%	2,4865	2,48645	13,72664	0,001313
Dış Duvar Sayısı	1	0,1028	1,48%	0,1028	0,10276	0,56727	0,459707
Desen Tipi	2	0,1800	2,59%	0,1800	0,09000	0,49687	0,615405
Hata	21	3,8039	54,83%	3,8039	0,18114		
Toplam	26	6,9373	100,00%				

Minitab programının basma gerilmesini hesaplamak için yapılan regresyon analizinde %45 doğruluk oranıyla elde edilen formül Denklem 3.5'te verilmiştir.

$$Ra = 13,34 + 0,00948 * T + 0,01858 * k + 0,0378 * n - 0,138 * y_2 - 0,194 * y_3 \quad (3.5)$$

T = Nozul sıcaklığı

k = Doluluk Oranı

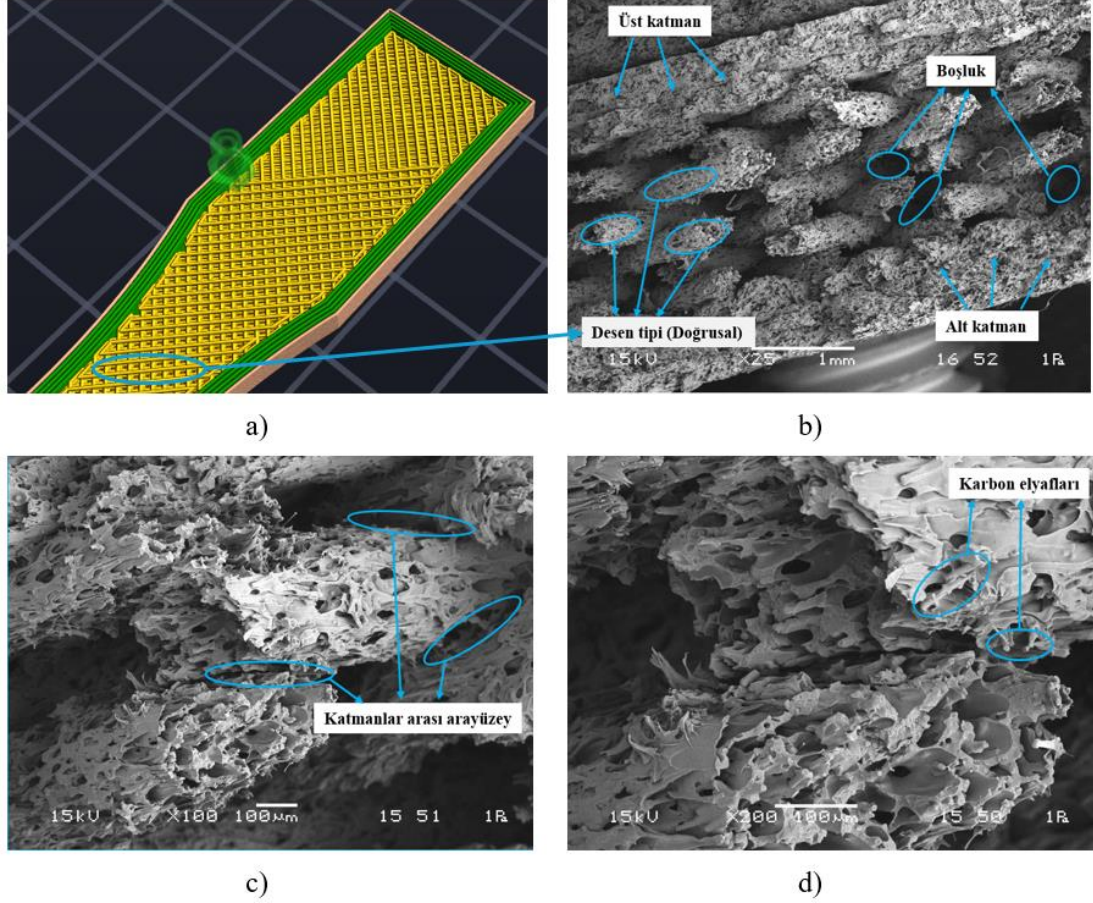
n = Dış Duvar Sayısı

y = Desen Tipi olarak ifade edilmektedir.

3.6. SEM Analizi

Çekme testi sonunda test numunelerinin kırık yüzeylerinden Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır. SEM görüntülerinde maksimum ve minimum çekme gerilmelerinin elde edildiği test numunelerinin farklı desen tipleri olan (doğrusal, bal peteği, gyro), katman kalınlığı ve optimizasyon (nozül sıcaklığı 285°C, doluluk oranı %80, dış duvar sayısı 9 ve desen tipi bal peteği) ile seçilen görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.32'de çekme test sonrası minimum çekme gerilmesine

ait doğrusal desen tipi ve doluluk oranı %40 olan numunenin çekme test sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.32a’da Flashforge dilimleme progmanında çapraz desen tipinin görünümü, nozul sıcaklığı 255°C, dış duvar sayısı 5 ve doluluk oranı %40 olan perspektif görüntüsü verilmiştir.

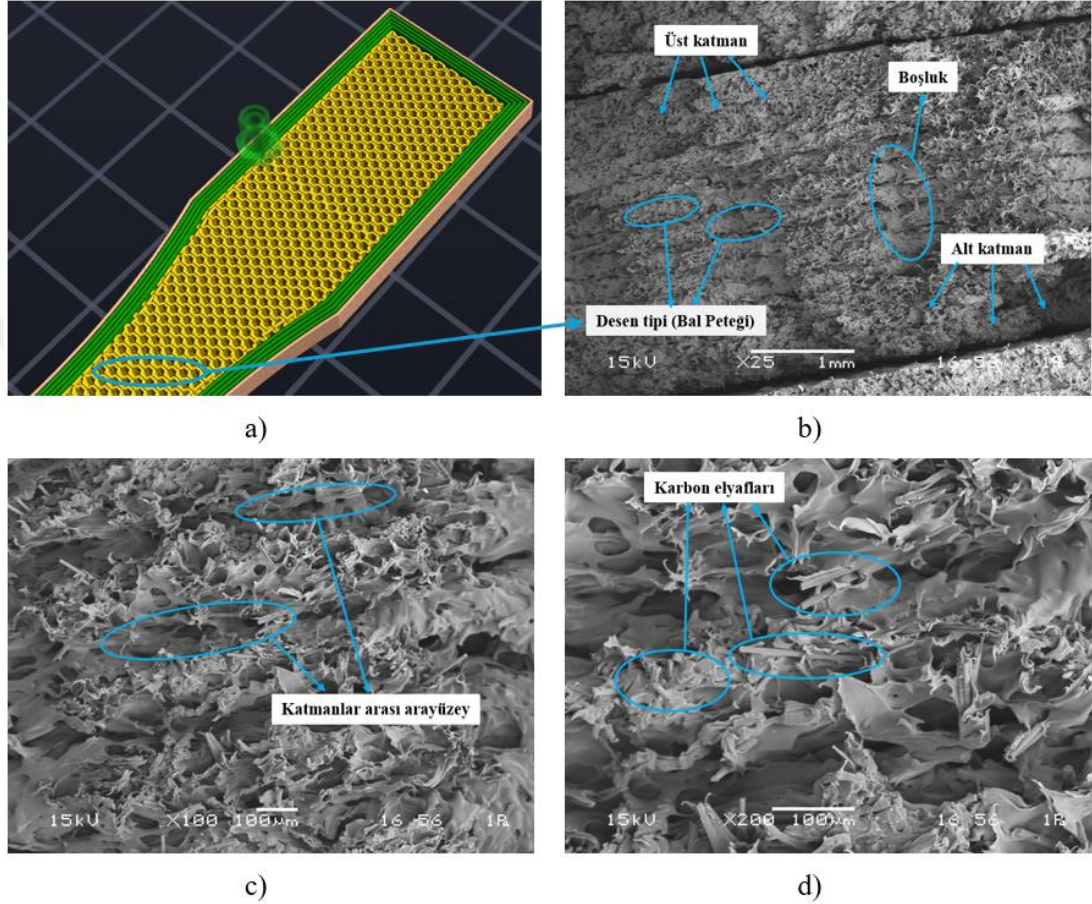


Şekil 3.32: PA66-20KE kompozit malzemenin minimum çekme gerilme elde edilen numunenin çekme test sonrası kırık yüzeyden Sem görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütmeli görüntü c) x100 büyütmeli görüntüsü d) x200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 3.32b’de de ise 25x büyütmeli üst ve alt katman kalınlıkları, %40 doluluk oranlı çapraz bağlantıların görüntüleri ve alt katman kalınlığı ve üst katmanlar arası arayüzey bağlantılarının iyi olduğunu görülmektedir. Şekil 3.32c’de deki SEM görüntüsünde katmanlar arası arayüzey bağlantıların görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.32d’de ise ana matris olan poliamid 66 polimeri bünyesine ilave edilen kısa karbon elyafların görüntüleri verilmiştir. Şekilde karbon elyafın ana matris ile makul seviyede bir arayüzey bağı yaptığı gözlenmiştir. Katmanlar arası ara-yüzey bağının makul seviyede olması yazıcı nozul sıcaklığın yani 255 °C ‘nin yeterli sıcaklıkta olduğunun kanıtıdır.

Çünkü polimer malzemenin birbirine yapışması için nozül sıcaklığının polimeri eritecek derecede yüksek olması gerekir.

Şekil 3.33’de Bal peteği desen tipi ile üretilen çekme test numunesinin çekme testi sonrası numunenin kopan yüzeyden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.

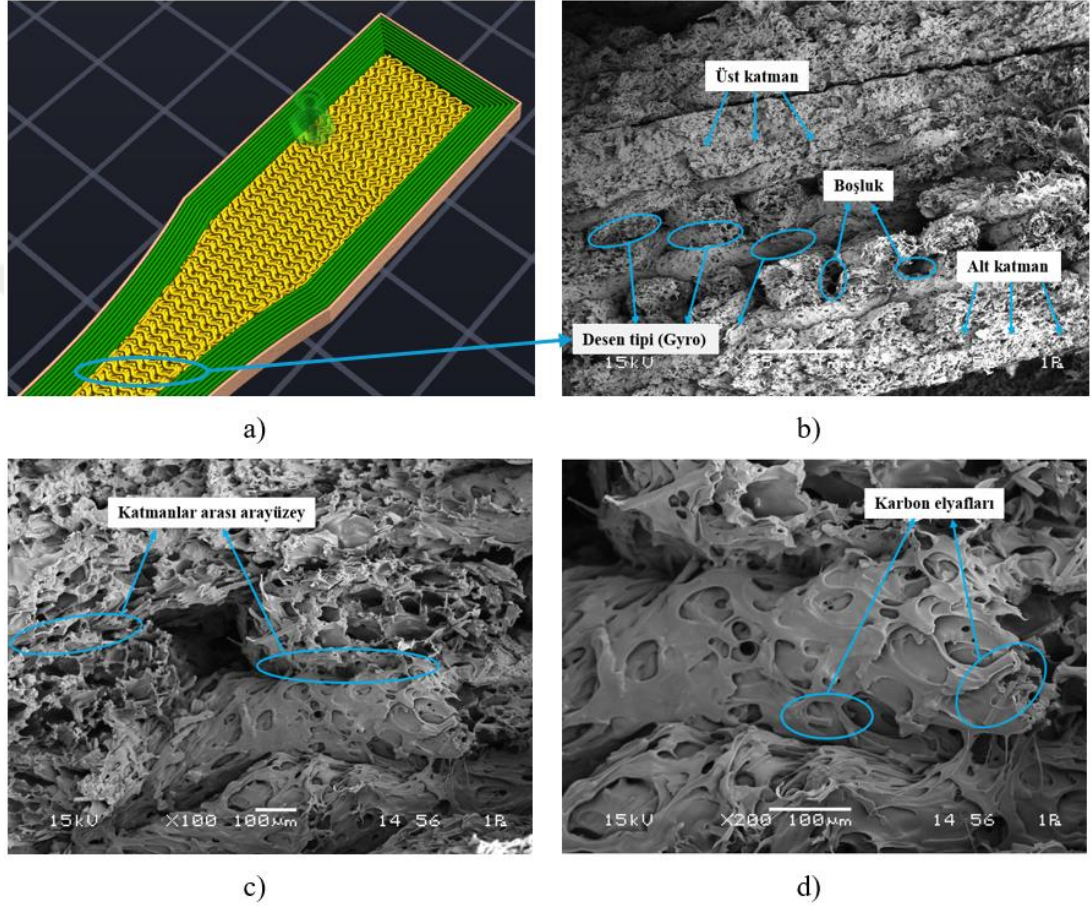


Şekil 3.33: PA66-20KE kompozit malzemenin Bal peteği desen tipi ile üretilen numunenin çekme test sonrası Sem görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütme görüntüsü c) x100 büyütme görüntüsü d) x200 büyütme görüntüsü.

Şekil 3.33a’da Flashforge dilimleme progmanında bal peteği desen tipi, nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı 5 ve doluluk oranı %80 olan perspektif görüntüsü; Şekil 3.33b’de 25x büyütme üst ve alt katman kalınlıkları, %80 doluluk oranlı bal peteği desenli bağlantıların görüntüleri ve alt katman kalınlığı ve üst katmanlar arası arayüzey bağlantılarının iyi olduğu görüntüler; Şekil 3.33c’de katmanlar arası arayüzey bağlantılarının iyi şeklinde bağlandığı nozul sıcaklığın üretim sıcaklığının yeterli olduğunu görülmektedir; Şekil 3.33d’de poliamid ana matris bünyesine ilave edilen kısa karbon elyafların görüntüleri verilmiştir. Şekilde karbon elyafın ana matris ile çok

iyi bağlandığı söylenebilir. Çünkü Şekil 3.6’da görüldüğü gibi maksimum çekme gerilmesi değeri de 18.4 MPa değerine ulaşmıştır. Bu da iyi bir arayüzey bağının olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 3.34’de gyro tipi desen ile üretilen çekme test numunesinin çekme test sonrası kopan kırık yüzeyden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.

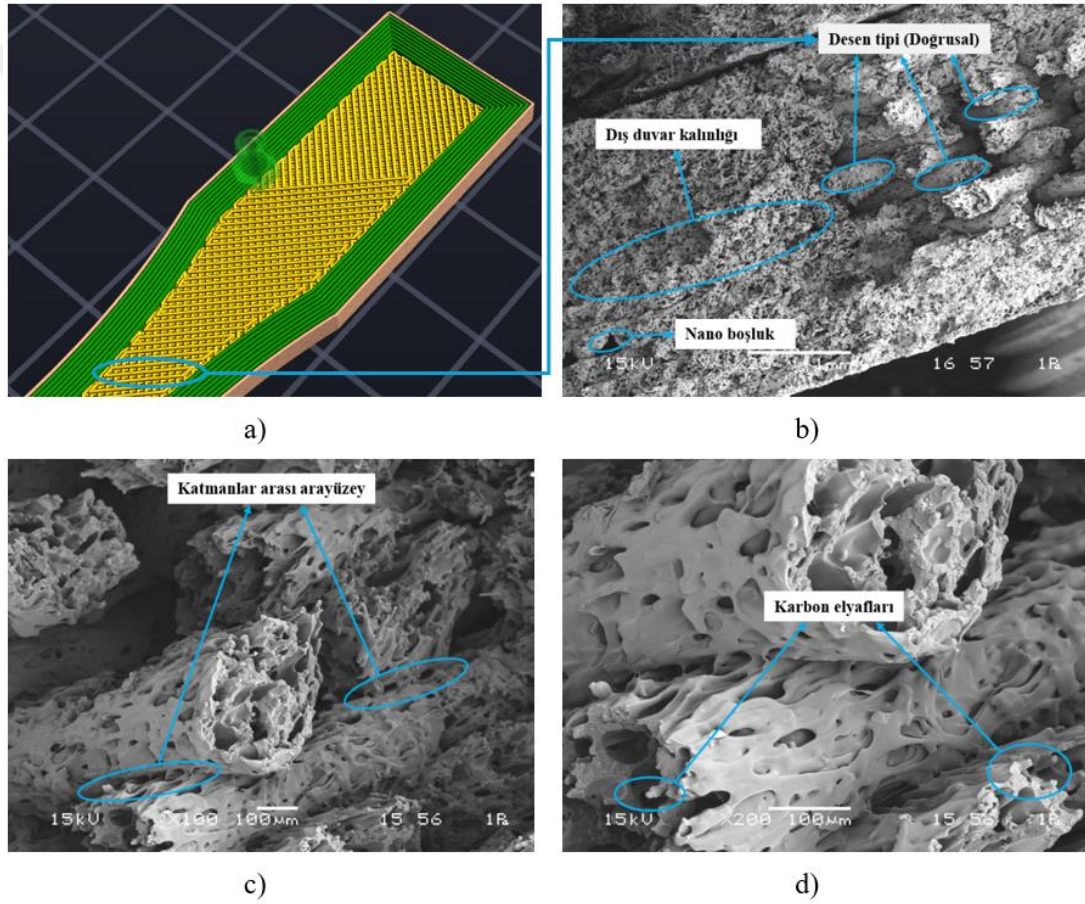


Şekil 3.34: PA66-20KE kompozit malzemeden Gyro tipi desen ile üretilen numunenin çekme testi sonrası alınan SEM mikroyapı görüntüleri; a) perspektif görüntü b) x25 büyütmeli görüntü c) x100 büyütmeli görüntü d) x200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 3.34a’da Flashforge dilimleme programından gyro desen tipli, nozul sıcaklığı 255°C, dış duvar sayısı 9 ve doluluk oranı %80 olan perspektif görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.34b’de ise 25x büyütmeli üst ve alt katman kalınlıkları, %80 doluluk oranlı gyro bağlantıların görüntüleri verilmiştir. Şekilde alt katman kalınlığı ve üst katmanlar arası arayüzey bağlantılarının iyi olduğunu görülmektedir; Şekil 3.34c’de ise katmanlar arası arayüzey bağlantıların nozul sıcaklığı 255 °C arayüzey bağlantılarının çok iyi olmayan ancak makul seviyede

bağlandığı ifade edilebilir. Şekil 3.34d’de poliamid 66 polimer ana matris üzerine eklenen kısa karbon elyaf takviyeli katmanların görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katmanlar arası arayüzey bağlantılarının iyi olduğu ancak çok iyi olmadığı görülmüştür. Bu da Şekil 3.6’da verilen PA66-20KE kompozitin çekme gerilmesi-% uzama grafiğinde gerilmenin maksimum gerilmeye (18.8MPa) göre daha düşük (16.5MPa) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3.35’de doğrusal desen tipi ile üretilen, maksimum çekme gerilmesinin elde edildiği numunenin çekme testi sonrası kırık yüzeyden alınan SEM görüntüleri verilmiştir.

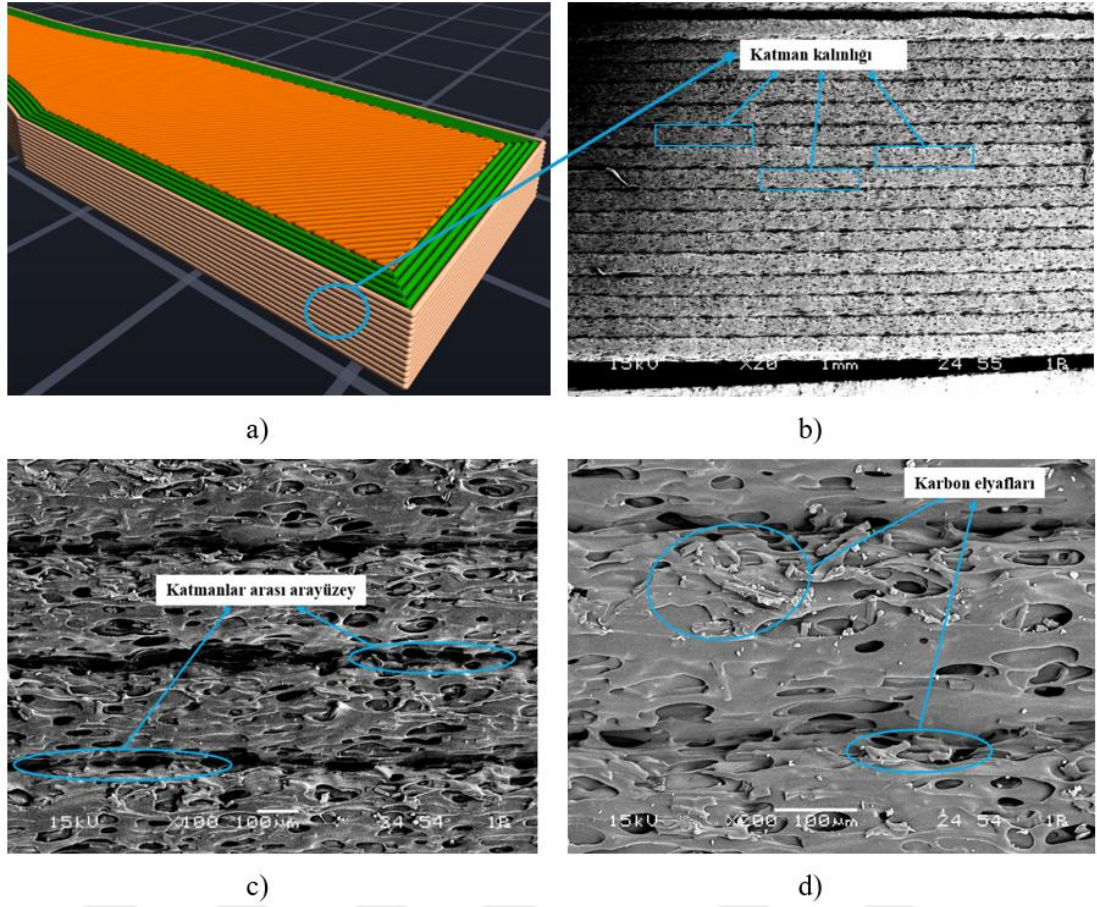


Şekil 3.35: PA66-20KE kompozit malzemenin maksimum çekme gerilmesinin elde edildiği numunenin çekme testi sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütmeli görüntü c) x100 büyütmeli görüntüsü d) x200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 3.35a’da Flashforge dilimleme progmanından doğrusal desen tipi, 285°C olan nozul sıcaklığı, 9 olan dış duvar sayısı ve %80 doluluk oranı olan perspektif görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.35b’de ise 25x büyütmeli üst ve alt katman

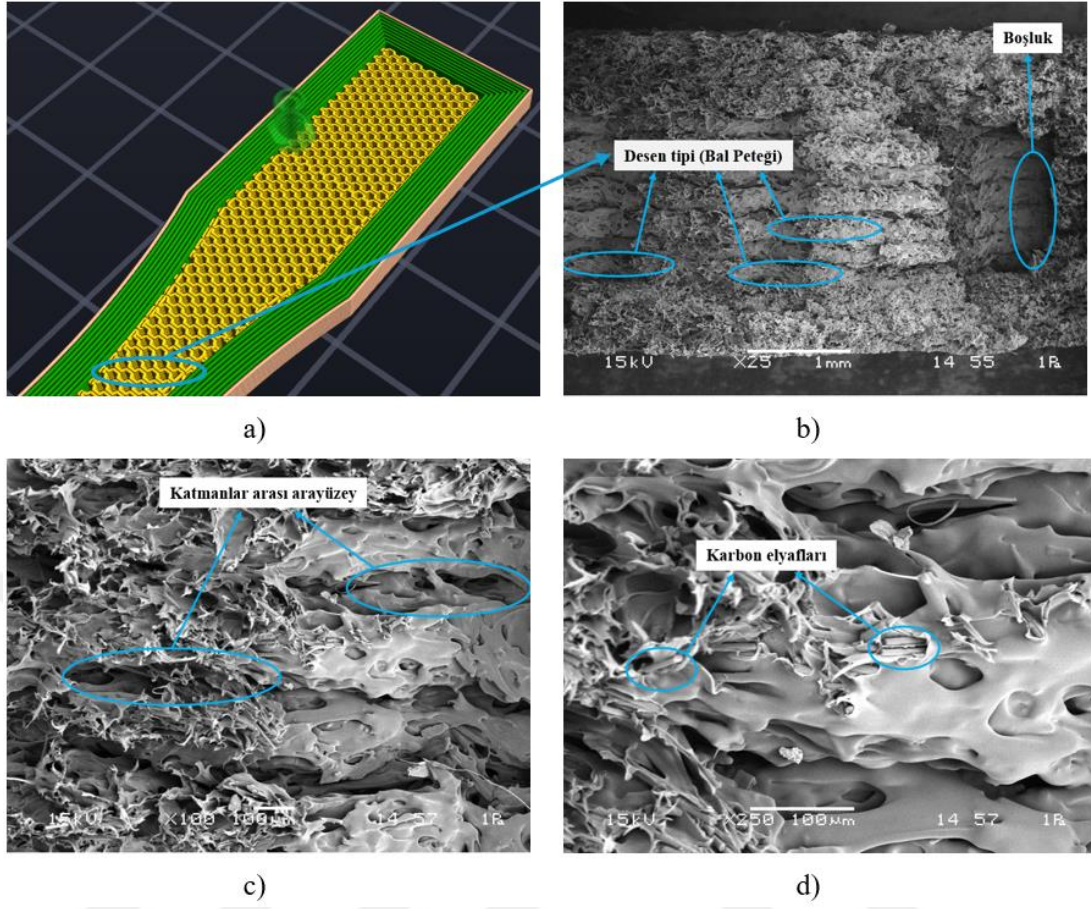
kalınlıkları ile %80 doluluk oranlı doğrusal bağlantıların görüldüğü mikroyapıları verilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda gözde görülemeyen ancak SEM görüntü ile görülebilen nano boyutlu boşluklar 3 boyutlu yazıcı ile üretim yapıldığında oluşabilmektedir. Burada bahsedilen nano boyuttaki boşluk/bosluklar dış duvar kalınlıklarının ortasında görülebilmektedir. Bu nano boşluklar çekme gerilmesine etki eden boşluk/bosluklardır. Numunenin dış duvar sayısı 9 olduğundan SEM görüntüsünde dış duvar kalınlığı ve arayüzey bağlantılarının iyi bir şekilde bağlandığı görülmektedir. Şekil 3.35c’de nozul sıcaklığı 285 °C’de katmanlar arası arayüzey bağının iyi olduğu söylenebilirken nozul sıcaklığının da yeterli olduğu ifade edilebilir. Şekil 3.35d’de poliamid 66 ana matrisi üzerine eklenen kısa karbon elyafların görüntüleri verilmiştir. Katmanlar arası arayüzey bağlantısının daha iyi olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 3.36’da 255°C nozul sıcaklığında üretilen test numunesinde katmanlar arası arayüzey bağını gösteren SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.36a’da Flashforge dilimleme programında 255°C nozul sıcaklığında üretilen numunenin perspektif görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.36b’de ise x20 büyütme katmanlar arası arayüzey bağının görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katmanların düzgün şeklinde birbiri üzerine eklendiği görülmektedir; Şekil 3.36c’de katmanlar arası arayüzey bağlantılarının 255 °C nozul sıcaklığındaki arayüz bağının makul bir şekilde bağ yaptığı ancak nozul sıcaklığının ise yeterli olduğu da görülmektedir. Nozul sıcaklığı arttıkça ara yüzey bağ yapısının daha da kuvvetlendiği ve sonuçları iyileştirdiği gözlemlendiğinden tez çalışmasında kullanılan en düşük nozul sıcaklığı 255°C olarak seçilmiştir. Şekil 3.36c’de arayüzey bağının zayıf gibi görünmesine rağmen fazla büyütme yapıldığında (bakınız Şekil 3.36d) katmanlar arası bağ yapısının çok iyi olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.36: PA66-20KE kompozit malzemenin 255°C nozul sıcaklığında üretilen numunenin katmanlar arası arayüzey bağ yapısını gösteren SEM mikroyapı görüntüleri; a) perspektif görüntü b) x20 büyütmeli görüntü c) x100 büyütmeli görüntü d) x200 büyütmeli görüntüsü.

Şekil 3.37’de varyans/gürültü analizinin verdiği en iyi üretim parametreler; nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %80 ve desen tipi ise bal peteği (bal peteği) olarak seçilmiştir. Bu parametreler ile üretilen çekme test numunesinin çekme test sonrası alınan kırık yüzey mikroyapı SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.37a’da Flashforge dilimleme programından alınan numunenin perspektif görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.37b’de ise alt ve üst katmanlar ile katmanlar arası arayüzeylerin bağlantılarının x25 büyütmeli görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.37c’de nozul sıcaklığı 285°C’de üretilen kompozitin katmanlar arası arayüzey bağ yapısının kuvvetli olduğu ifade edilebilir. Şekil 3.37d’de ise poliamid 66 ile kısa karbon elyafların birbirlerine iyi bağlandığı yani arayüzey bağlarının kuvvetli olduğu söylenebilir.



Şekil 3.37: PA66-20KE kompozit malzemenin optimizasyon parametrelerine göre üretilen çekme test numunesinin test sonrası kırık yüzeyinden alınan SEM görüntüleri; a) perspektif görüntüsü b) x25 büyütmeli görüntü c) x100 büyütmeli görüntü d) x250 büyütmeli görüntüsü.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karbon elyaf takviyeli PA 66 polimer kompozit filament ile üretilen parçaların mekanik özellikleri incelenmiş olup, imalat parametrelerinin optimizasyonu yapılarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Yapılan test sonuçlarından elde edilen değerine göre;

- 1- PA66-20KE kompozit filament ile üretilen numunelerde yapılan çekme testlerinde en yüksek gerilmenin elde edilebileceği optimum parametre seviyeleri: %80 olan doluluk oranı, 285°C olan nozul sıcaklığı, 9 olan dış duvar sayısı ve bal peteği desen tipi olarak belirlenmiştir.
- 2- Basma testlerinde en yüksek gerilmelerin elde edilebileceği optimum parametre seviyeleri: 285°C olan nozul sıcaklığı, %80 olan doluluk oranı, 9 olan dış duvar sayısı ve bal peteği desen tipi olarak belirlenmiştir.
- 3- Eğme testinde ise maksimum eğme yükünün elde edilebileceği optimum parametre seviyeleri: 285°C olan nozul sıcaklığı, 9 olan dış duvar sayısı, %80 olan doluluk oranı ve gyro tipi desen tipi tespit edilmiştir.
- 4- İzod darbe testleri sonucunda elde edilen optimum parametre seviyeleri: 270°C olan nozul sıcaklığı, 9 olan dış duvar sayısı, doğrusal olan desen tipi ve %60 olan doluluk oranı olarak belirlenmiştir.
- 5- Yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre seviyeleri: %40 olan doluluk oranı, 270°C olan nozul sıcaklığı, 5 olan dış duvar sayısı ve gyro olan desen tipi olarak belirlenmiştir.
- 6- Nozul sıcaklığı 285°C, dış duvar sayısı 9, doluluk oranı %80 ve bal peteği desen tipine sahip çekme test numunelerinin ara-yüzey bağının en iyi olduğu taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden alınan mikroyapı incelemelerinden anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akhondi, S., Matte, C. D., Kwok, T. H., (2023), A study on mechanical behavior of 3D printed elastomers with various infills and densities, *Manufacturing Letters*, 35, 592–602, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.035>
- Alagheband, M., Zhang, Q., Jung, S., (2024), Investigating the influence of infill patterns and mesh modifiers on fatigue properties of 3D printed polymers, *International Journal of Fatigue*, 187, 108463, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108463>
- Ali, Z., Yan, Y., Mei, H., Cheng, L., Zhang, L., (2023), Effect of infill density, build direction and heat treatment on the tensile mechanical properties of 3D-printed carbon-fiber nylon composites, *Composite Structures*, 304, 116370, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116370>
- American Society for Testing and Materials., (2016), ASTM D638-14, Standard practice for preparation of metallographic specimens, *ASTM International*, 82, 1–15, <https://doi.org/10.1520/D0638-14.1>
- Auffray, L., Gouge, P. A., Hattali, L., (2022), Design of experiment analysis on tensile properties of PLA samples produced by fused filament fabrication, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(11–12), 4123–4137, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08216-7>
- Bassett, K., Carriveau, R., Ting, D. S. K., (2015), 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 186–193, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.01.002>
- Braga, D. F. O., Azevedo, L., Cipriano, G., Moreira, P. M. G. P., (2024), Structural Integrity of Dissimilar Materials and Dissimilar Additive Manufacturing Processes: A Review, *Procedia Structural Integrity*, 54, 631–637, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.128>.
- Campbell, Thomas Williams, Christopher Ivanova, Olga Garrett, B., (2012), Strategic Foresight Report, *Atlantic Council*, 3–7.
- Chen, R., Baich, L., Lauer, J., Senesky, D. G., Manogharan, G., (2022), Effects of Part Orientation, Printer Selection, and Infill Density on Mechanical Properties and Production Cost of 3D Printed Flexural Specimens, *Manufacturing Letters*, 33, 549–560, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.069>

- Cheng, H., Tang, M., Zhang, J., Wang, H., Zhou, J., Wang, Q., Qian, Z., (2024), Effects of rCF attributes and FDM-3D printing parameters on the mechanical properties of rCFRP, *Composites Part B: Engineering*, 270, 111122, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111122>
- Clegg, B. A., Shrestha, D. R., Emami, N., (2023), Tribo-Mechanical Properties and Bioactivity of Additively Manufactured PAEK Materials for Load Bearing Medical Applications: A Systematic Review, *Biotribology*, 35–36, 100263, <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2023.100263>
- Das, A., Chatham, C. A., Fallon, J. J., Zawaski, C. E., Gilmer, E. L., Williams, C. B., Bortner, M. J., (2020), Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers, *Additive Manufacturing*, 34, 101218, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101218>
- De Pasquale, G., Bertana, V., Scaltrito, L., (2018), Experimental evaluation of mechanical properties repeatability of SLA polymers for labs-on-chip and bio-MEMS, *Microsystem Technologies*, 24(8), 3487–3497, <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3753-1>
- Ding, S., Zou, B., Zhuang, Y., Wang, X., Li, L., Liu, J., (2023), Hybrid layout and additive manufacturing of continuous carbon/glass fibers reinforced composites, and its effect on mechanical properties, *Composite Structures*, 319, 117133, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117133>
- Frazier, W. E., (2014), Metal additive manufacturing: A review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917–1928, <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Gay, P., Blanco, D., Pelayo, F., Noriega, A., Fernández, P., (2015), Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts, *Procedia Engineering*, 132, 70–77, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.481>
- Ge, T., Li, Y., Gao, D., Yang, C., Li, F., (2024), Hybridizing additive manufacturing and sheet forming process to manufacture complex components with multi-features: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 345–364, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.032>
- Ghidini, T., Grasso, M., Gumpinger, J., Makaya, A., Colosimo, B. M., (2023), Additive manufacturing in the new space economy: Current achievements and future perspectives, *Progress in Aerospace Sciences*, 142, 100959, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100959>
- Gibson, I., Shi, D., (1997), Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process, *Rapid Prototyping Journal*, 3(4), 129–136, <https://doi.org/10.1108/13552549710191836>
- Godec, M., Malej, S., Feizpour, D., Donik, Balažic, M., Klobčar, D., Pambaguian, L.,

- Conradi, M., Kocijan, A., (2021), Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Materials Characterization*, 172, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>
- Golubovic, Z., Bojovic, B., Petrov, L., Sedmak, A., Milovanović, A., Mišković, Ž., Milošević, M., (2024), Comparative analysis of ABS materials mechanical properties, *Procedia Structural Integrity*, 56, 153–159, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.050>
- Gonzalez, G., Roppolo, I., Pirri, C. F., Chiappone, A., (2022), Current and emerging trends in polymeric 3D printed microfluidic devices, *Additive Manufacturing*, 55, 102867, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102867>
- Gorelik, M., (2017), Additive manufacturing in the context of structural integrity, *International Journal of Fatigue*, 94, 168–177, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.07.005>
- Herschdorfer, L., Negreiros, W. M., Gallucci, G. O., Hamilton, A., (2021), Comparison of the accuracy of implants placed with CAD-CAM surgical templates manufactured with various 3D printers: An in vitro study, *Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(6), 905–910, <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.017>
- Islam, M. N., Baxevanakis, K. P., Silberschmidt, V. V., (2023), Viscoelastic characterisation of additively manufactured composites with nylon matrix: Effects of type and orientation of fibres, *Composites Part B: Engineering*, 263, 110815, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110815>
- Karad, A. S., Sonawwanay, P. D., Naik, M., Thakur, D. G., (2023), Experimental tensile strength analysis of ABS material through FDM technique, *Materials Today: Proceedings*, 245, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.216>
- Karalekas, D., Aggelopoulos, A., (2003), Study of shrinkage strains in a stereolithography cured acrylic photopolymer resin, *Journal of Materials Processing Technology*, 136, 146–150, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00028-1)
- Khabia, S., Jain, K. K., (2019), Influence of change in layer thickness on mechanical properties of components 3D printed on Zortrax M 200 FDM printer with Z-ABS filament material , Accucraft i250+ FDM printer with low cost ABS filament material, *Materials Today: Proceedings*, 26, 1315–1322, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.268>
- Khayyam, H., Jazar, R. N., Nunna, S., Golkarnarenji, G., Badii, K., Fakhrhoseini, S. M., Kumar, S., Naebe, M., (2020), PAN precursor fabrication, applications and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling, *Progress in Materials Science*, 107, 100575, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100575>
- Krinitcyn, M., Fu, Z., Harris, J., Kostikov, K., Pribytkov, G. A., Greil, P., Travitzky,

- N., (2017), Laminated Object Manufacturing of in-situ synthesized MAX-phase composites, *Ceramics International*, 43, 9241–9245, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.079>
- Kumar Mawandiya, B., Pancholi, K., Shah, D. B., Joshi, S. J., (2022), Parametric study on process parameters of FDM 3D printer for thermoplastic materials, *İçinde Materials Today: Proceedings* (C. 59, ss. 373–378), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.504>
- Kumar, R., Singh, R., Hui, D., Feo, L., Fraternali, F., (2018), Graphene as biomedical sensing element: State of art review and potential engineering applications, *Composites Part B: Engineering*, 134, 193–206, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.049>
- Kumar, S., (2003), Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach, *Jom*, 55, 43–47, <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0175-y>
- Lee, Y. L., Jeong, S. T., Park, S. J., (2014), Study on manufacturing of recycled SiC powder from solar wafering sludge and its application, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 1, 299–304, <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0036-x>
- Li, Y., Gao, S., Dong, R., Ding, X., Duan, X., (2018), Additive Manufacturing of PLA and CF/PLA Binding Layer Specimens via Fused Deposition Modeling, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 492–500, <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3065-0>
- Lopes, L. R., Silva, A. F., Carneiro, O. S., (2018), Multi-material 3D printing: The relevance of materials affinity on the boundary interface performance, *Additive Manufacturing*, 23, 45–52, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.027>
- Ma, R., Liu, R., Lu, B., (2024), Approaches Used to Design Support Structures for Ceramic Additive Manufacturing: A Review, *Additive Manufacturing Frontiers*, 3, 200136, <https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200136>
- Mahesh, E. U., Venkata Narayana, Y., Sridhar, B., (2023), Investigations of influence of infill pattern on tensile strength of 3D-printed poly lactic acid and Polyethylene Terephthalate Glycol material using Design of Experiments, *Materials Today: Proceedings*, xxxx, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.406>
- Mbogori, M., Vaish, A., Vaishya, R., Haleem, A., Javaid, M., (2022), Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) in orthopaedic practice- A current concept review, *Journal of Orthopaedic Reports*, 1, 3–7, <https://doi.org/10.1016/j.jorep.2022.03.013>
- Mishra, A., Kumar, M., Kumar, R., Kumar Sharma, A., (2023), An investigation on tensile strength of 3D printed parts of Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) material, *Materials Today: Proceedings*, 295, 3–7, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.088>

- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., Semprimoschnig, C., (2018), Additive manufacturing — A review of 4D printing and future applications, *Additive Manufacturing*, 24, 606–626, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.038>
- Nabavi-Kivi, A., Ayatollahi, M. R., Rezaeian, P., Razavi, N., (2022), Investigating the effect of printing speed and mode mixity on the fracture behavior of FDM-ABS specimens, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 118, 103223, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103223>
- Narasaki, H., Ogawa, K., Tsujimoto, K., (1979), Determination of trace phosphorus in organic materials by a combined low temperature ashing-spectrophotometry, *Bunseki Kagaku*, 28, 195–196, https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.28.3_195
- Ng, C. H., Bermingham, M. J., Dargusch, M. S., (2022), Controlling grain size, morphology and texture in additively manufactured β -titanium alloy with supertransus hot isostatic pressing, *Additive Manufacturing*, 59, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103176>
- Nigam, S., Ahirwar, P. N., (2023), A comparative study on the effect of infill density, shape structure, and materials on tensile properties of FDM printed components, *Materials Today: Proceedings*, xxxx, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.101>
- O'Driscoll, C., Owodunni, O., Asghar, U., (2024), Optimization of 3D printer settings for recycled PET filament using analysis of variance (ANOVA), *Heliyon*, 10, e26777, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26777>
- Özer, G., (2020), Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9, 606–621, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Özsoy, K., Duman, B., (2017), Eklemeli imalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1, 36–48, <http://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/issue/33982/376178>
- Park, M. E., Shin, S. Y., (2018), Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers, *Journal of Prosthetic Dentistry*, 119, 861.e1-861.e7, <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.08.020>
- Pavithran, N. R., Harichandran, R., Kumar, D. V., (2023), Effect of Yttria-stabilized zirconia coating on the corrosion and thermal behaviour of additive manufactured Inconel 718 alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 171877, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171877>
- Pérez, M., Medina-Sánchez, G., García-Collado, A., Gupta, M., Carou, D., (2018), Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters, *Materials*, 11,

<https://doi.org/10.3390/ma11081382>

- Phillips, B. T., Alder, J., Bolan, G., Nagle, R. S., Redington, A., Hellebrekers, T., Borden, J., Pawlenko, N., Licht, S., (2020), Additive manufacturing aboard a moving vessel at sea using passively stabilized stereolithography (SLA) 3D printing, *Additive Manufacturing*, 31, 100969, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100969>
- Pinho, A. C., Amaro, A. M., Piedade, A. P., (2020), 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components, *Waste Management*, 118, 426–434, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.003>
- Podgórski, R., Wojasiński, M., Trepkowska-Mejer, E., Ciach, T., (2023), A simple and fast method for screening production of polymer-ceramic filaments for bone implant printing using commercial fused deposition modelling 3D printers, *Biomaterials Advances*, 146, <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213317>
- Portarapillo, M., Danzi, E., Guida, G., Luciani, G., Marmo, L., Sanchirico, R., Di Benedetto, A., (2022), On the flammable behavior of non-traditional dusts: Dimensionless numbers evaluation for nylon 6,6 short fibers, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 78, 104815, <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104815>
- Pratheesh Kumar, M. R., Saravanakumar, K., Arun Kumar, C., Saravanakumar, R., Abimanyu, B., (2024), Experimental investigation of the process parameters and print orientation on the dimensional accuracy of fused deposition modelling (FDM) processed carbon fiber reinforced ABS polymer parts, *Materials Today: Proceedings*, 98, 166–173, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.062>
- Quagliato, L., Yeon Kim, S., Ryu, S. C., (2022), Quasi-ductile to brittle transitional behavior and material properties gradient for additively manufactured SLA acrylate, *Materials Letters*, 329, 133121, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133121>
- Racz, L., Dudescu, M. C., (2024), Numerical evaluation of the infill pattern upon mechanical proprieties of 3D printed materials, *Procedia Structural Integrity*, 56, 3–10, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.030>
- Ramli, R. N., Lee, C. K., Kassim, M. A., (2020), Extraction and Characterization of Starch from Microalgae and Comparison with Commercial Corn Starch, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 716, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/716/1/012012>
- Rodríguez-Reyna, S. L., Díaz-Aguilera, J. H., Acevedo-Parra, H. R., García, C. J., Gutierrez-Castañeda, E. J., Tapia, F., (2024), Design and optimization methodology for different 3D processed materials (PLA, ABS and carbon fiber reinforced nylon PA12) subjected to static and dynamic loads, *Journal of the*

Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 150,
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106257>

- Rodríguez-Reyna, S. L., Mata, C., Díaz-Aguilera, J. H., Acevedo-Parra, H. R., Tapia, F., (2022), Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing, *Materials Today Communications*, 33, 104774, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104774>
- S V, L. S., A, K., C, D., (2024), Evaluation of mechanical properties of 3D printed PETG and Polyamide (6) polymers, *Chemical Physics Impact*, 100491, <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2024.100491>
- Şahin, K., Turan, B. O., (2018), Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi, *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2, 97–116, <https://doi.org/10.30692/sisad.441648>
- Sajjad, R., Butt, S. U., Saeed, H. A., Anwar, M. T., Rasheed, T., (2023), Impact of multiple infill strategy on the structural strength of single build FDM printed parts, *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 105–110, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.065>
- Sandanamsamy, L., Mogan, J., Rajan, K., Harun, W. S. W., Ishak, I., Romlay, F. R. M., Samykano, M., Kadirgama, K., (2023), Effect of process parameter on tensile properties of FDM printed PLA, *Materials Today: Proceedings*, xxxx, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.217>
- Singh, J., Goyal, K. K., Sharma, R., (2023), Impact of FDM variables on the tensile property of 3D printed CF-PLA parts, *Materials Today: Proceedings*, xxxx, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.226>
- Singh, J., Kumar Goyal, K., Kumar, R., (2022), Effect of filling percentage and raster style on tensile behavior of FDM produced PLA parts at different build orientation, *Materials Today: Proceedings*, 63, 433–439, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.444>
- Singh, R., Kumar, R., Farina, I., Colangelo, F., Feo, L., Fraternali, F., (2019), Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures, *Polymers*, 11, 1–14. <https://doi.org/10.3390/polym11010062>
- Singh, R., Kumar, R., Farina, I., De Piano, M., Amendola, A., Fraternali, F., (2019), Mechanical and experimental study on the use of sustainable materials for additive manufacturing, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 473, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/473/1/012010>
- Singh, S., Prakash, C., Ramakrishna, S., (2019), 3D printing of polyether-ether-ketone for biomedical applications, *European Polymer Journal*, 114, 234–248, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.035>
- Sladen, J. G., Ferein, A. N., Maxwell, T. M., Wong, R., (1988), Reoperation within 2 years of aortofemoral bypass, *Canadian Journal of Surgery*, 31, 224–227,

<https://doi.org/10.1520/D0695-15.2>

Speed, F., (2021), Nylon CF, *ePA CF Technical Datasheet Version 4.0*, 6, 3–4.

Su, N., Pierce, R. S., Rudd, C., Liu, X., (2022), Comprehensive investigation of reclaimed carbon fibre reinforced polyamide (rCF/PA) filaments and FDM printed composites, *Composites Part B: Engineering*, 233, 109646, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109646>

Sun, H., Zou, B., Wang, X., Chen, W., Zhang, G., Quan, T., Huang, C., (2024), Advancements in multi-material additive manufacturing of advanced ceramics: A review of strategies, techniques and equipment, *Materials Chemistry and Physics*, 319, 129337, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129337>

Taghizadeh, M., Zhu, Z. H., (2024), Acta Astronautica A comprehensive review on metal laser additive manufacturing in space : Modeling and perspectives, *Acta Astronautica*, 222, 403–421, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.06.027>

Tang, P., Zhao, X., Shi, H., Hu, B., Ding, J., Yang, B., Xu, W., (2024), A review of multi-axis additive manufacturing: Potential, opportunity and challenge, *Additive Manufacturing*, 83, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104075>

Taşdemir, V., (2021), Investigation of Dimensional Integrity and Surface Quality of Different Thin-Walled Geometric Parts Produced via Fused Deposition Modeling 3D Printing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 3381–3387, <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05809-x>

Turaka, S., Jagannati, V., Pappula, B., Makgato, S., (2024), Impact of infill density on morphology and mechanical properties of 3D printed ABS/CF-ABS composites using design of experiments, *Heliyon*, 10, e29920, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29920>

Udroiu, R., Braga, I. C., (2017), Polyjet technology applications for rapid tooling, *MATEC Web of Conferences*, 112, 1–6, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011>

Valdez, M., Kozuch, C., Faierson, E. J., Jasiuk, I., (2017), Induced porosity in Super Alloy 718 through the laser additive manufacturing process: Microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 725, 757–764, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.198>

Vaňková, T., Kroupa, T., Zemčík, R., Krystek, J., Zemčík, H., (2023), Identification of temperature-dependent parameters for an elastic–plastic–damage material model of 3D-printed PETG, *Polymer*, 284, 126295, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126295>

Venkateswar Reddy, M., Hemasunder, B., Mahadevapa Chavan, P., Dish, N., Paul Savio, A., (2023), Study on the significance of process parameters in improvising the tensile strength of FDM printed carbon fibre reinforced PLA, *Materials Today: Proceedings*, xxxx,

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.330>

- Vishwas, M., Basavaraj, C. K., (2017), Studies on Optimizing Process Parameters of Fused Deposition Modelling Technology for ABS, *Materials Today: Proceedings*, 4, 10994–11003, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.057>
- Wang, C., He, Y., Lin, Z., Zhao, X., Sun, C., Guo, R., Wang, X., Zhou, F., (2024), Mechanical and tribological properties of FDM-printed polyamide, *Tribology International*, 191, 109198, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109198>
- Wang, Q., Mitsumura, N., Chen, Q., Sarkar, A., Kurokawa, H., Sekiguchi, K., Sugiyama, K., (2014), Investigation of condensation reaction during phenol liquefaction of waste woody materials, *International Journal of Sustainable Development and Planning* 9, <https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N5-658-668>
- Wang, X., Shujaat, S., Shaheen, E., Jacobs, R., (2021), Accuracy of desktop versus professional 3D printers for maxillofacial model production, A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 112, 103741, <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103741>
- Yamamoto, K., Luces, J. V. S., Shirasu, K., Hoshikawa, Y., Okabe, T., Hirata, Y., (2022), A novel single-stroke path planning algorithm for 3D printers using continuous carbon fiber reinforced thermoplastics, *Additive Manufacturing*, 55, 102816, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102816>
- Yaman, N., Öktem, T., Seventekin, N., (2006), Karbon Liflerinin Üretimi, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 164–173.
- Zeng, C., Liu, L., Bian, W., Leng, J., Liu, Y., (2021), Bending performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composite corrugated sandwich structures with shape memory capability, *Composite Structures*, 262, 113626, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113626>
- Zhang, G., Guo, J., Chen, H., Cao, Y., (2021), Organic mesh template-based laminated object manufacturing to fabricate ceramics with regular micron scaled pore structures, *Journal of the European Ceramic Society*, 41, 2790–2795, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.11.012>
- Zhang, L., Lin, J., Shao, H., Yang, Z., Liu, B., Li, C., (2024), An unsupervised end-to-end approach to fault detection in delta 3D printers using deep support vector data description, *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 214–228, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.020>
- Zhao, J., Yang, Y., Li, L., (2020), A comprehensive evaluation for different post-curing methods used in stereolithography additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 867–877, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.077>