



**ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ PEDAL
PİMİNİN MEKANİK DAYANIMININ ÜRETİM
PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK
OPTİMİZASYONU**
Muhammed Ali KÖKSAL



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ PEDAL PİMİNİN MEKANİK
DAYANIMININ ÜRETİM PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK
OPTİMİZASYONU**

Muhammed Ali KÖKSAL

ORCHID ID: 0000-0003-3569-7883

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YILDIZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

TEZ ONAYI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLMİŞ PEDAL PİMİNİN MEKANİK DAYANIMININ ÜRETİM PARAMETRELERİNE BAĞLI OLARAK OPTİMİZASYONU

Muhammed Ali KÖKSAL

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YILDIZ

Günümüzde, otomotiv, makine, uzay, uçak, medikal gibi birçok alanda kullanılmakta olan üç boyutlu yazıcılar her geçen gün popülaritesini arttırmaktadır. Plastik, metal, seramik gibi hammadde kullanarak üretim yapabilen üç boyutlu yazıcılarda özellikle plastik parça imalatı için mekanik dayanım değerleri oldukça önemlidir. Üç boyutlu yazıcı ile imal edilen plastik parçanın mekanik özellikleri, kullanılan malzemenin çeşidine göre, ortam koşullarına (sıcaklık, nem v.b.) ve üretim parametreleri gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Bu çalışmada polietilen tereftalat glikol (PETG) malzemesinin maksimum mekanik dayanımı göz önüne alınarak üretim parametreleri incelenmiştir. Eriyik yığılma modelleme tipi üç boyutlu yazıcı kullanılan bu çalışmada PETG malzemesinin mekanik özellikleri dikkate alınırken, nozzle sıcaklığı, katman yüksekliği, soğutucu fan hızı, yazdırma hızı, çizgi kalınlığı, örgü yönü ve örgü örtüşme oranı parametreleri dikkate alınmıştır. Mekanik dayanım, ASTM D638 standardı dikkate alınarak ölçülmüştür. Maksimum çekme kuvvetini minimum deney sayısı ile elde edebilmek adına bu çalışmada taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Yapılan test sonuçları ile en yüksek çekme dayanımı 235°C nozzle sıcaklığı, 0,2mm katman yüksekliği, 0 devir/dakika soğutucu fan hızı, 25mm/s yazdırma hızı, 0,2mm çizgi kalınlığı, çekme yönüne paralel örgü yönü ve %20 örgü örtüşme oranı parametreleri ile elde edilmiştir. Maksimum çekme dayanımı elde edilen numunenin malzeme verileri dikkate alınarak literatüre örnek bir çalışma kazandırmak adına eriyik yığılma modelleme tipi yazıcıdan PETG malzemesi ile üretilmiş eksen pimi kullanılan otomobil debriyaj pedal kutusu simülasyonu oluşturulmuş ve simülasyonlar laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu yazıcı, üretim parametreleri optimizasyonu, polietilen tereftalat glikol, PETG

2021, XII + 88 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

**“OPTIMIZATION OF THE MECHANICAL STRENGTH OF THE PEDAL PIN
PRODUCED WITH A THREE-D PRINTER DEPENDING ON PRODUCTION
PARAMETERS”**

Muhammed Ali KÖKSAL

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assistant. Prof. Dr. Ahmet YILDIZ

Nowadays, 3D printers, which are used in many fields such as automotive, machinery, space, aircraft and medical, are increasing their popularity day by day. Mechanical strength values are very important in 3D printers that can produce using raw materials such as plastic, metal and ceramic, especially for the production of plastic parts. The mechanical properties of the plastic part manufactured with a three-dimensional printer can be affected by factors such as ambient conditions (temperature, humidity, etc.) and production parameters, depending on the type of material used. In this study, the production parameters of polyethylene terephthalate glycol (PETG) material were investigated considering the maximum mechanical strength. In this study using fused deposition modeling type 3D printer, while the mechanical properties of the PETG material are evaluated, the parameters of nozzle temperature, layer height, cooling fan speed, printing speed, line thickness, mesh direction and mesh overlap ratio are taken into account. Mechanical strength has been measured considering the ASTM D638 standard. In order to obtain the maximum tensile strength with the minimum number of tests, the taguchi method was used in this study. With the test results, the highest tensile strength is 235 ° C nozzle temperature, 0.2mm layer height, 0 cycle / minute cooling fan speed, 25mm / s printing speed, 0.2mm line thickness, mesh direction parallel to the drawing direction and 20% mesh overlap has been obtained. In order to provide an exemplary study to the literature considering the material data of the sample with maximum tensile strength, an automobile clutch pedal box simulation using the pivot pin produced with PETG material from a fused deposition modeling type printer was run. And the simulations were verified by tests carried out in the laboratory environment.

Key words: Three dimensional printer, production parameters optimization, polyethylene terephthalate glycol, PETG.
2021, XII + 88 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecimin planlanma, araştırma, yürütme ve oluşumunda ilgisini, desteğini, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren kıymetli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet YILDIZ’a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmaya katkıda bulunup bana yardımcı olan değerli; Onur EROL, Orhan DEDEOĞLU, Kaan KANSIZ ve Nevzat Bener ALADAĞLI’ya teşekkür ederim.

Deney numunelerinin test aşamasında gösterdiği özveri ve yardımları için Gökhan TUNÇ ve Selçuk BALABAN’ a teşekkür ederim.

Son olarak bugünleri görebilmem adına büyük emek sarfeden, maddi ve manevi her zaman yanımda olan başta değerli annem Nihal KÖKSAL olmak üzere, babam Mustafa Rifat KÖKSAL ve ablam Büşra KÖKSAL’a ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Ali KÖKSAL
03/09/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMA	3
2.1. Sonlu Elemanlar Analizi İçin Eklemeli İmalat	3
2.2. Eklemeli İmalat Genel Bakış	5
2.2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri	6
2.2.1.1 Stereolitografi(Vat Photo-Polymerization)	8
2.2.1.2 Lamine Nesne Üretimi(Sheet Lamination)	9
2.2.1.3 Toz Yatak Kaynaştırma(Powder Bed Fusion).....	10
2.2.1.4 Doğrudan Enerji Biriktirme(Directed Energy Deposition).....	11
2.2.1.5 Yapıştırıcı Malzeme Kullanılarak Katmanlı İmalat(Binder jetting)	12
2.2.1.6 Malzeme Jeti(Material Jetting)	13
2.2.1.7 Eriyik Yığma Modelleme(Fused Deposition Modelling/Material Extrusion)	14
2.3. Eriyik Yığma Modelleme Mateyali Olarak Polietilen Tereftalat Glikol	18
2.4. Eklemeli İmalat Test Numunesi.....	20
2.5. FDM Proses Parametreleri Ve Bu parametrelerin Üretilen Parçaların Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	21
2.6. Taguchi Metodu	27
2.6.1 Ortogonal Tasarım	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM	31
3.1. Deney Malzemesi ve Özellikleri.....	31
3.2. Üretim Esnasında Kullanılan FDM Tipi Yazıcı ve Özellikleri.....	32
3.3. Deney Numunelerinde Kullanılan Parametreler	36
3.4. Deney Tasarımının Oluşturulması ve Numune Üretimi	39
3.5. Çekme Testinin Yapılışı.....	47
3.6. Sonlu Elemanlar Analizinin Oluşturulması	50
3.6.1. Malzeme Datalarının Tanımlanması	53
3.6.2. Simülasyonun Hazırlanması.....	57
3.6.2.1 Debriyaj Pedalı Simülasyonunun Hazırlanması.....	57
3.7 PETG Eksen Pimi Testi	63
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	67
4.1. Çekme Testi	67
4.2. PETG Eksen Pimi Test Sonuçları	74
4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	75
5. SONUÇ	82
KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
3B	Üç Boyutlu
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Yapıştırıcı ile katmanlı üretim
CAD	Computer Added Design
CNC	Computerized Numerical Control
Eİ	Eklemeli İmalat
EYM	Eriyik Yığma Modelleme
FDM	Fused Deposition Modelling
FEA	Finite Element Analys
G	Glikol
HIPS	High Denstity Polistiren
HP	Hızlı Prototiple
ISO	International Organization for Standardization
MJ	Material Jetting
OA	Ortogonal Diziler
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PEEK	Polieter eter keton
PEI	Polietilenimin
PET	Polietilen Tereftalat
PETG	Polietilen tereftalat glikol
PLA	Polilaktik Asit
PP	Polipropilen
SEA	Sonlu elemanlar analizi
SEM	Scanning electron microscope
SLA	Stereolitografi aparatı
SLS	Selective laser sintering
STL	Stereolitografi
TPU	Termoplastik Poliüretan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1: Ekelemli imalat basamakları.....	5
Şekil 2.2 ASTM' ye göre eklemeli imalat sınıflandırması.....	6
Şekil 2.3 Stereolitografi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	8
Şekil 2.4 Lamine nesne üretimi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	9
Şekil 2.5 Toz yataklı kaynaştırma tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	10
Şekil 2.6 Doğrudan enerji biriktirme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	11
Şekil 2.7 Yapıştırıcı malzeme kullanarak katmanlı imalat süreci.....	12
Şekil 2.8 Yapıştırıcı malzeme kullanarak katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiş parça örneği.....	12
Şekil 2.9 Malzeme jeti tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	13
Şekil 2.10 Eriyik yığma modelleme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci.....	14
Şekil 2.11 Eriyik yığma modelleme tipi eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş örnek parçalar.....	15
Şekil 2.12 Farklı ilk katman yüksekliğine sahip çıktı örnekleri.....	16
Şekil 2.13 Şematik bir şekilde parçanın tabla üzerindeki çarpılması örneği.....	16
Şekil 2.14 ABS materyali ile basılmış bir parçada gerçekleşen çarpılması örneği.....	17
Şekil 2.15 FDM tipi yazıcılarda kullanılan malzemeler	17
Şekil 2.16 Polietilen Tereftalat Glikol örnek filamet görseli.....	18
Şekil 2.17 Panneerselman ve ark. Tarafından gerçekleştirilen çalışmada parametrelerin çekme dayanımına olan etkisi.....	19
Şekil 2.18 Tip I ASTM Çekme Testi Numunesi.....	21
Şekil 2.19 Büyük katman kanlınlığına sahip bir parçadaki hava boşluklarının temsili olarak gösterildiği numune kesiti.....	24
Şekil 2.20 (a) SEM mikroskobu altında FDM ile üretilmiş bir polimer parçanın üst yüzeyini göstermektedir. ve (b) SEM mikroskobu altında FDM ile üretilmiş bir polimer parçanın kesit alanı.....	25
Şekil 2.21 Farklı pozisyonda bulunan numune örnekleri.....	26
Şekil 3.1 Standart TwoTrees marka Bluer model FDM tipi yazıcı.....	32
Şekil 3.2 Z eksenli düzensizliğinden kaynaklanan parça yüzey pürüzlülüğü örneği.....	33
Şekil 3.3 Standart durumdaki twotrees bluer FDM tipi yazıcının X ve Y eksen tasarımları.....	34
Şekil 3.4 Deforme olmuş bir tekerlek ve yataklama elemanı olarak plastik burç kullanılan mil.....	34
Şekil 3.5 Modifiye edilmiş Two Trees Bluer.....	35
Şekil 3.6 farklı katman yüksekliklerine sahip numuneler.....	37
Şekil 3.7 Farklı çizgi kalınlıkları belirlenmiş olan numuneler.....	37
Şekil 3.8 Farklı örgü örtüşme oranlarına sahip numuneler.....	38
Şekil 3.9 Farklı örgü yönlerine sahip numuneler.....	39
Şekil 3.10 Cura arayüzü.....	40
Şekil 3.11 Üretim aşamasındaki bir numune.....	42
Şekil 3.12 Birinci numune serisi.....	43
Şekil 3.13 İkinci numune serisi.....	43
Şekil 3.14 Üçüncü numune serisi.....	44
Şekil 3.15 Dördüncü numune serisi.....	44
Şekil 3.16 Beşinci numune serisi.....	45
Şekil 3.17 Altıncı numune serisi.....	45

Şekil 3.18 Yedinci numune serisi.....	46
Şekil 3.19 Sekizinci numune serisi.....	46
Şekil 3.20 Testlerde kullanılan 'Shimadzu Autograph AGS-X 50 kN' çekme cihazı.....	47
Şekil 3.21 Numunenin test cihazına bağlanması.....	48
Şekil 3.22 Debriyaj pedalı eksen pimi.....	50
Şekil 3.23 Debriyaj pedalı.....	51
Şekil 3.24 Statik modülü kullanıma hazır Ansys arayüzü.....	52
Şekil 3.25 GetData Graph yardımı ile verilerin elde edilişi.....	54
Şekil 3.26 Elastisite modülünün malzeme eğrisi üzerinden ayrıştığı nokta.....	55
Şekil 3.27 Ansys malzeme tanımı bölgesi arayüzü.....	56
Şekil 3.28 Ağ yapısı tamamlanmış debriyaj pedal kutusu.....	58
Şekil 3.29 Ağ yapısı tamamlanmış burçlar.....	58
Şekil 3.30 Debriyaj pedal kutusunda tanımlanan kontaklar birinci resim.....	59
Şekil 3.31 Debriyaj pedal kutusunda tanımlanan kontaklar ikinci resim.....	60
Şekil 3.32 Pedal kutusunun sabitlendiği montaj delikleri.....	61
Şekil 3.33 Debriyaj pedalı için yapılan mafsalları tanımlamaları.....	62
Şekil 3.34 Eksen piminin CURA ile katmanlanması.....	63
Şekil 3.35 Eksen piminin FDM yazıcı ile üretilmesi.....	64
Şekil 3.36 İmalatı tamamlanmış eksen pimi.....	64
Şekil 3.37 PETG Eksen pimi ile üretilmiş debriyaj pedal kutusu.....	65
Şekil 3.38 Test aparatına montajı yapılmış debriyaj pedal kutusu.....	66
Şekil 4.1 Taguchi analizi sonucu maksimum çekme değerlerini veren parametreler.....	68
Şekil 4.2 0,2mm ve 0,4 mm çizgi kalınlıklarına sahip numunelerin 20X yakınlaştırılmış kesit görüntüleri.....	71
Şekil 4.3 Taguchi analizi sonucunda elde edilen gürültü faktörü parametreleri.....	71
Şekil 4.4 Optimum parametre ve seviyeleri kullanılarak üretilmiş olan numuneler.....	72
Şekil 4.5 Optimum parametreler ile üretilmiş olan numunelerin ortalama çekme testi grafiği.....	73
Şekil 4.6 Optimum parametre ve seviyeleri kullanılarak üretilen numunelerin çekme testi sonrası durumu.....	73
Şekil 4.7 800N yük altındaki debriyaj pedal kutusu.....	74
Şekil 4.8 800N yüke maruz kaldıktan sonra eksen pimi.....	75
Şekil 4.9 835N yük altında kırılan eksen pimi.....	75
Şekil 4.10 Metal malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu deformasyon sonuçları.....	76
Şekil 4.11 Metal malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi stress değerleri sonuçları.....	77
Şekil 4.12 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu deformasyon sonuçları.....	78
Şekil 4.13 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi stress değerleri sonuçları.....	78
Şekil 4.14 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi plastik uzama değerleri sonuçları.....	79
Şekil 4.15 PETG malzemeli eksen piminin hassas terazi ile ölçümü.....	80
Şekil 4.16 Metal malzemeli eksen piminin hassas terazi ile ölçümü.....	80
Şekil 4.17 Metal ve PETG malzemeli pimlerin yan yana görseli.....	81
Şekil 5.1 835N yük altında kırılan eksen pimi ile eksen pimi simülasyonundaki stress bölgeleri karşılatırmalı görseli.....	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Sonlu elemanlar analizi için gerekli olan malzeme girdileri.....	4
Çizelge 2.2 Kullanılan hammaddeye göre sınıflandırılmış eklemeli imalat yöntemleri...	7
Çizelge 2.3 FDM tipi eklemeli imalat için 7 farklı proses parametresi ve tanımları.....	22
Çizelge 2.4 Torres ve diğerleri (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirlenen parametreler ve seviyeleri.....	23
Çizelge 2.5 Ortogonal Dizi ile full faktöriyel dizayn olarak gerçekleştirilen deney sayıları arasındaki farklar.....	28
Çizelge 2.6 Bazı standart ortogonal dizinler.....	29
Çizelge 2.7 $L_8(2^7)$ ortogonal dizisi.....	30
Çizelge 3.1 PETG malzemesinin mekanik özellikleri(Filament testi).....	31
Çizelge 3.2 Belirlenen parametreler ve seviyeleri.....	36
Çizelge 3.3 Belirlenen parametrelerin L_8 matrisindeki dizilimi.....	41
Çizelge 3.4 Numunelerin Et Kalınlığı ve Genişlikleri.....	49
Çizelge 3.5 Debriyaj Pedalında Kullanılan S420MC ve 20MB4 Malzemelerinin Mekanik Özellikleri.....	51
Çizelge 4.1 Test sonuçlarının da ilave edildiği Taguchi L_8 matrisi.....	67

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat(Additive Manufacturing[AM]) veya hızlı prototipleme(HP) olarak da adlandırılan üç boyutlu(3B) baskılama, nesnelerin geometrik modellerinin doğrudan bir bilgisayar destekli tasarım dosyasından alınarak, malzemenin biriktirilmesi yoluyla, bir baskı kafası veya nozül kullanılarak katman katman üretilmesidir.

Model matematiksel olarak bir dizi paralel kesite bölünür ve g-kodu olarak bilinen bir makine koduna dönüştürülür. Somut üç boyutlu nesneler, herhangi bir ek alet veya form olmadan malzeme katman katman eklenerek oluşturulmaktadır. Tüm süreç, özelleştirilebilir malzemelerle karmaşık şekiller oluşturmada daha fazla tasarım esnekliği sunar ve şu anda uçak, otomotiv, diş hekimliği, tıbbi implantlar gibi birçok endüstri tarafından kullanılmaktadır (Mohamed, Masood ve Bhowmik, 2015). Başlangıçta, eklemeli imalat teknolojileri çoğunlukla hızlı prototipleme için kullanılsa da, günümüzde 3B yazdırılmış parçaların % 33,8' i son kullanıcı ürünü olarak üretilmektedir (Dolzyk ve Jung, 2019).

Birçok farklı tipte 3B yazıcı çeşidinin içerisinde, eriyik yığıma modelleme(EYM) tipi yazıcılar, düşük maliyetli ve masaüstü yazıcılar olarak geliştirilmeleri sayesinde en popüler 3B yazıcı tipi haline gelmiştir. EYM işlemi termoplastik polimerleri eriterek karmaşık şekilli parçaların üretilmesine ve hareketli bir nozülden ekstrüzyona izin verir. Yarı erimiş formdaki malzeme, bir cam yatağa veya önceden yazdırılmış tabakanın üstüne çökeltilir. EYM için mevcut olan çeşitli termoplastik malzemelerden, akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit(PLA) en yaygın kullanılan ve üzerine araştırma yapılan malzemelerdir. Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, polieteter eter keton, polipropilen, polieterimid ve polikarbonat (PC) gibi diğer termoplastik materyalleri içermektedir. Polietilen tereftalat glikol(PETG), pazarın %76,25'ini paylaşan PLA ve ABS' den sonra %5,9 pay ile üçüncü yaygın kullanılan filamenttir (Dolzyk ve Jung, 2019).

Eriyik yığıma modelleme tipi yazıcılarda gerçekleştirilen üretim yöntemi sonucunda, üretilen mamülün mekanik değerleri malzemeye de bağlı olarak üretim

parameterlerinden oldukça etkilenebilmektedir. Bu çalışmanın odak noktası, 3B yazıcılarda kullanılan polimer cinslerinden polietilen tereftalat glikol (PETG) malzemesinin maksimum çekme dayanımını elde edecek şekilde eriyik yığma modelleme tipi yazıcı ile üretimindeki parametreleri, taguchi optimizasyon yönteminden faydalanarak belirlemektir.

Bilgisayar destekli simülasyolarda 3B baskı sistemlerinin olması gerektiği gibi çalıştığından emin olmak ve 3B yazdırılan parçaların tasarımcıların beklediği tam fiziksel özelliklere sahip olduğunu analiz etmek için, 3B üretim parametreleri önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır (Anonim 2016a). 3B yazıcılarda kullanılan malzemelerin birçoğunun FEA programlarında kullanımına yönelik bilgileri, dolgu oranı, dolgu deseni, katman yükseliği gibi geniş bir üretim parametre kombinasyonlarına sahip olduklarından dolayı ulaşılabilir değildir (Anonim 2016b).

Finite Element Analysis (FEA), türkçesi Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) gibi bilgisayar destekli simülasyon programları için doğrulaması yapılmış ve girdi olarak kullanılacak malzeme bilgilerine geleneksel yöntemlerle üretilmiş materyaller için ulaşılabilenken, eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş materyaller için aynı durum söz konusu değildir (Anonim 2016b). Literatüre PETG malzemesi için bu doğrultuda katkı yapmayı amaçlayan bu çalışmada, 3B yazıcı ile imal edilmiş parçanın FEA analizi için gerekli mekanik özelliklerinin başarılı bir şekilde belirlenmesi amacıyla, çeşitli baskı parametreleri ile bir dizi test parçasını yabancı kaynaklarda Fused Deposition Modelling (FDM) yani eriyik yığma modelleme olarak bilinen yazıcı ile üretilmesini gerektirmiştir. Üretilen parçalar mekanik bir test olan çekme testine tabi tutulup maksimum çekme dayanımının elde edildiği parametreler belirlenmiş ve maksimum çekme değerinin elde edildiği numunenin çekme eğrisi uygun bir FEA modeli geliştirmek için gereken malzeme bilgisine katkıda bulunmuştur. Elde edilen bilgiler ile birlikte örnek bir çalışma ortaya koyabilmek adına otomobil pedal kutusu ele alınarak pedal kutusu eksen piminin PETG malzemesi ile EYM tipi yazıcıda imalatı yapılmış ve mekanik testlere tabi tutulmuş bunun paralelinde mekanik testler ANSYS programında simüle edilerek PETG malzemesinin mekanik dayanımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMA

2.1. Sonlu Elemanlar Analizi İçin Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat(Eİ) yöntemi, düşük hacimli ve düşük maliyet etkili üretim imkanının yanı sıra, çok yönlü imalat, hafif, içi boşaltılmış kabuk malzeme ve bilgisayar destekli numerik kontrollü(CNC) freze, döküm veya kalıplama gibi geleneksel imalat tekniklerini kullanarak mümkün olmayan karmaşık yapıların imalatı gibi olağanüstü özelliklere sahip özelleştirilmiş parçaların üretilmesine imkan sağlar (Zarbakhsh, Iravani ve Amin-Akhlaghi,2015).

Ürün geliştirme açısından, eklemeli imalat ile üretilen parçaların kullanım sonrasında mekanik ve çevresel baskılara dayanması önemlidir (Goh ve diğerleri, 2017). Eklemeli imalat ile üretilen parçaların kullanım alanlarında parçadan beklenen şekilde çalıştığından emin olmak ve üretilen parçaların tasarımcıların beklediği fiziksel özelliklere sahip olduğunu analiz edebilmek için bilgisayar destekli simülasyonlar önemli bir konuma sahiptir.

Sonlu elemanlar analizlerinin(SEA), mühendislik alanında mekanik problemlerin çözümünde oldukça geniş bir kullanımı bulunmaktadır. SEA ile, üretilmesi planlanan parçanın kullanım koşullarına göre belirlenmiş yükler ve sınırlamalar kümesi altında nasıl davranacağı öngörülebilir. SEA genellikle parçanın yer değiştirme profilini belirlemek ve parçanın mekanik olarak kırılıp, başarısız olup olmayacağını belirlemek için kullanılır (Anonim 2016b).

Bir SEA için temel girdilerden biri, parçayı oluşturmak için kullanılan malzemelerle ilgili verilerdir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak, gerilme ve yer değiştirme profilleri farklı olacak ve bu nedenle mekanik dayanım eşikleri farklı olacaktır. Geleneksel üretim yöntemleri, bir SEA için girdi olarak kullanılabilen iyi tanımlanmış malzeme verilerine sahiptir, ancak bu veriler eklemeli imalat ile üretilmiş parçalar için yaygın olarak ulaşılamamaktadır. Eklemeli imalat için malzeme bilgilerinin rahatlıkla ulaşılabilir olmamasının en büyük nedenleri arasında ise geniş bir üretim parametre sayısına sahip olup bu parametrelerin ürün kalitesi ve mekanik özelliklerini etkilemesinden

kaynaklanmaktadır (Anonim 2016b). Bir SEA çalıştırılırken, doğru bir simülasyon sonucu elde edilebilmesi adına girdi olarak olması gereken malzeme bilgileri aşağıdaki Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Sonlu elemanlar analizi için gerekli olan malzeme girdileri

-	Elastisite Modülü
-	Poisson Oranı
-	Kesme Modülü
-	Özkütle
-	Çekme Dayanımı
-	Basma Dayanımı
-	Akma Dayanımı
-	Termal Genleşme Katsayısı
-	Termal İletkenlik Katsayısı
-	Spesifik Sıcaklık
-	Malzeme Sönüm Oranı

Çizelge 2.1’ de verilen malzeme bilgileri genel olarak bütün simülasyon tipleri için verilmiştir. Ancak araştırma konusuna göre farklı türde simülasyonlar bulunmakta olup her tip simülasyon için girilmesi zorunlu girdiler farklılık gösterebilmektedir. Örnek olarak ANSYS programı baz alındığında zamandan bağımsız yani statik bir simülasyon gerçekleştirebilmek için elastisite modülü ve poisson oranı tanımlamak yeterlidir. Ancak simülasyon sonrasında malzeme için plastik deformasyon değerlendirmesi yapabilmek adına akma dayanımı girdi olarak simülasyona verilmelidir. Aynı simülasyon içerisinde kırılma yorumu yapabilmek için çekme dayanımı da simülasyona tanıtılmalıdır. Zamana bağlı yani dinamik bir analiz ele alınmak istendiğinde ise malzeme özkütle değeri ve sönüm oranı simülasyonun düzgün bir şekilde sonuç verebilmesi adına gereklidir. Bunun yanında verilecek olan malzeme termal iletkenlik katsayısı, termal genleşme katsayısı vb. girdiler ancak simülasyon sınır şartları ve simülasyonda odaklanılan amaç doğrultusunda kullanılabilir.

2.2. Eklemeli İmalat Genel Bakış

Eklemeli imalat, 3B sanal tasarım verilerini üretimi gerçekleştirilmek istenen tasarımın katman katman oluşturmak için dijital dilimleme yöntemini kullanarak kalıplama veya makine ile işleme gibi geleneksel imalat yöntemlerine gerek kalmadan fiziksel objelere dönüştüren bilgisayar destekli bir süreçtir. Şekil 2.1’ de eklemeli imalat adımları görsel olarak sıralanmıştır. Günümüzde 3B yazıcıların erişilebilirliği her zamankinden daha kolay hale gelmiş ve endüstriyel üretim ve genel amaçlar için 3B baskı kullanılabilirliği önemli ölçüde artmıştır. Malzemeler daha ucuz ve erişilebilir hale gelmiş ve yazıcıların ekonomik açıdan daha ucuz ve boyutsal açıdan daha küçük hale gelmesiyle işlevselliği oldukça artmıştır (Ligon, Liska, Stampfl, Gurr ve Mülhaupt, 2017).



Şekil 2.1: Ekelemli imalat basamakları(Vladinovskis, 2020’ den değiştirilerek alınmıştır.)

Eklemeli imalat yönteminin, diğer üretim metodlarına göre avantajlarından dolayı son yıllarda hem endüstrilerin hem de araştırma ve akademik camianın ilgisini çekmiştir. Bu işlem, hurda azaltma, tasarımda çok yönlülük (tasarlama ve değiştirme özgürlüğü) gibi avantajlara sahiptir ve otomasyon olanaklarının yanı sıra daha hafif ve daha sağlam ürünler Eİ sayesinde mümkün hale gelmiştir. 3B üretim tekniği, yakın zamana kadar sadece fonksiyonel ve estetik prototiplerin üretilmesi için uygun olarak görülüyordu ve aynı zamanda hızlı prototipleme olarak da adlandırılıyordu. Ancak günümüzde 3B imalat, artan hassasiyet, tasarım özgürlüğü ve malzeme çeşitliliği nedeniyle endüstriyel bir üretim teknolojisine dönüşmüştür (Panneerselvam, Raghuraman ve Vamsi, 2021).

2.2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Hali hazırda, eklemeli imalat için farklı malzemeler ve teknolojiler kullanılarak karakterize edilen birkaç eklemeli üretim süreci bulunmaktadır. Parça imalatı için kullanılan hammaddelere göre, eklemeli imalat süreçleri şu şekilde sınıflandırılabilir: Sıvı bazlı, katı bazlı ve toz bazlı (Yuan, Shen, Chua ve Zhou, 2019). Baskılama işlemleri üretim şekline göre şu şekilde sınıflandırılabilir; malzeme ekstrüzyonu, tekne foto polimerizasyonu, tabaka laminasyonu, toz yatağı füzyonu, bağlayıcı püskürtme, malzeme püskürtme ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (Lee, An ve Chua, 2017). Şekil 2.2’ de ASTM’ ye göre üretim şekline göre sınıflandırılmış eklemeli imalat yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2 ASTM’ ye göre eklemeli imalat sınıflandırması. (Lee, An ve Chua, 2017’ den değiştirilerek alınmıştır.)

Çizelge 2.2’ de eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan katı sıvı ve toz olarak 3 ana gruba ayrılan hammadde için, kullanılan teknolojilerin kendi içerisindeki karşılaştırılması detaylarıyla gösterilmektedir.

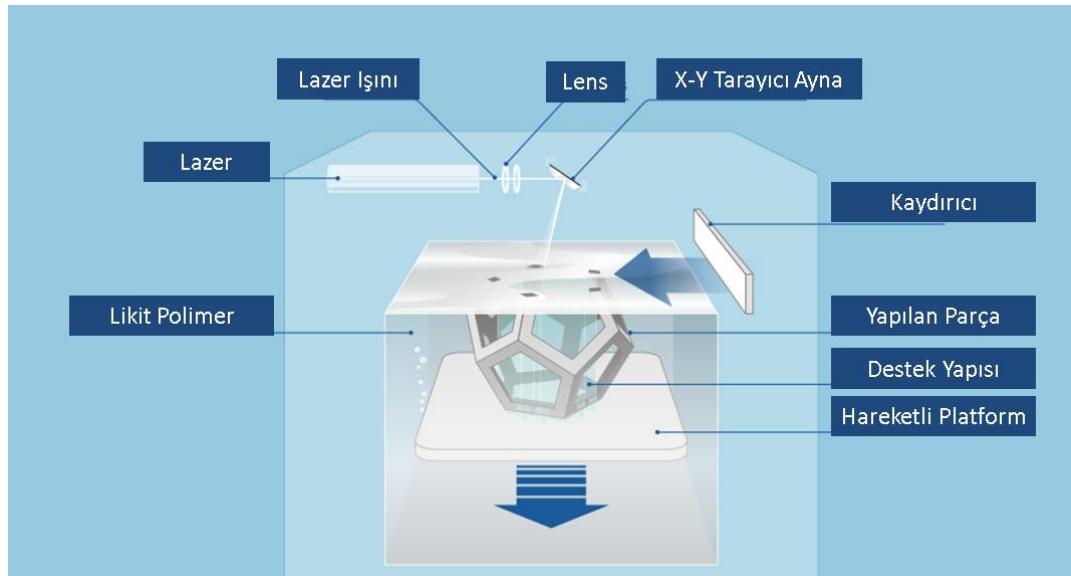
Çizelge 2.2 Kullanılan hammadeye göre sınıflandırılmış eklemeli imalat yöntemleri
(Sürmen, 2019’ dan alınmıştır.)

	TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	EYM	Termoplastik	Termal Enerji	*Düşük yazıcı maliyeti *Çoklu malzeme ile baskı *Yüksek mukavemet *Düşük parça çözünürlüğü *Zayıf yüzey iş-sonu *Düşük baskı hızı
		Polimerize Edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL(SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	*Yüksek baskı hızı *Yüksek parça çözünürlüğü *Yüksek detay *Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	*Yüksek baskı hızı *Çözünürlük projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme Püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV Işını	*Çoklu malzeme ile baskı *İyi yüzey iş-sonu *Yüksek doğruluk *Yüksek detay
	KATI	Yapışık Objeler	Sac Laminasyonu	LOM	Kağıt Plastik Film Metalik Sac Seramik Bant	Lazer Işını	*İyi yüzey iş-sonu *Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük *Büyük boyutlu malzeme basabilme *Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz Yataklı Eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	*Yüksek doğruluk *Yüksek detay *Tam dolu parça üretimi *Yüksek mukavemet *Destek yapıları gerekmez
				DMSL	Metal tozu, Seramik tozu		
				SLM		Elektron Işını	
				EBM			
		Direk Enerji Depolama		LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	*Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme *Son-işlem gerekir
				EBAM			
	Yapıştırma	Yapıştırıcı Püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	*Renki obje baskısı *Destek yapıları gerekmez *Geniş malzeme seçeneği *Yüksek baskı hızı *Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir Düşük dayanım Yüksek gözeneklilik	

2.2.1.1 Stereolitografi(Vat Photo-Polymerization)

Stereolitografi yöntemi, sıvı fotolitografi reçinelerinden veya fotopolimerlerden prototipler, modeller, bitmiş ürünler yapmak için kullanılan eklemeli üretim teknolojisidir. Fotopolimerler, seçici olarak polimerize edilebilen ve/veya ışııkla görüntüye maruz kaldıktan sonra çapraz bağlanabilen monomerler, oligomerler, polimerlere dayalı bileşimlerdir. Reçinenin kürlenmesi, bir ultraviyole ışık veya diğer benzer enerji kaynağı ile ışıılama yoluyla gerçekleşir. 3B nesne, hareketli bir platformun bir malzeme kabına daldırılmasıyla katman katman büyütölür. Katman yüksekliğı ne kadar düşükse, modelin daha doğru geometrisi basılacaktır, ancak aynı zamanda, baskı süresi ve başarısızlık olasılığı da artacaktır (Eshkalak, Ghomi, Dai, Choudhury ve Ramakrishna, 2020).

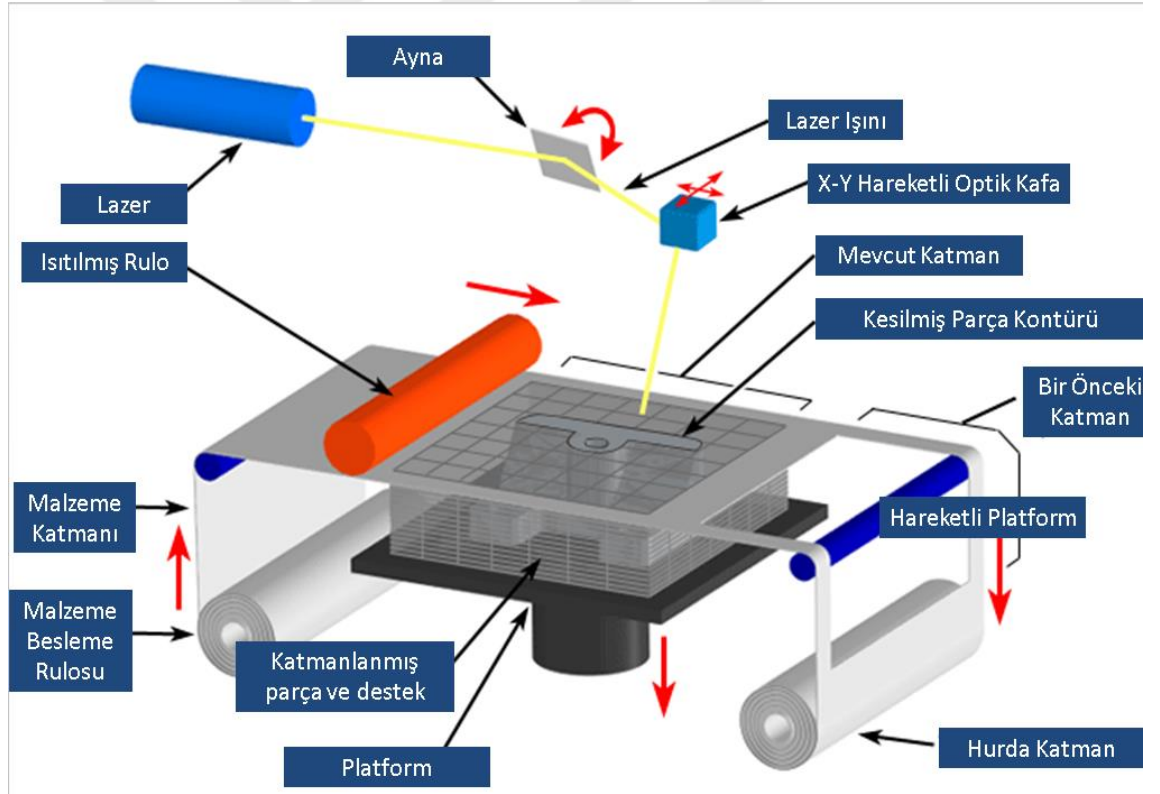
Düzgün yüzeyler, oldukça hassas şekiller verilerek bu yöntem sayesinde oluşturulabilir; ancak, fotopolimer malzemeler çok kararlı olmayan yapılar olmakla birlikte mekanik özellikleri stabil değildir. Bu tip katmanlı imalat yöntemlerinin tercih edilebilir alanları arasında hızlı prototipleme ve bazı kalıp uygulamaları sayılabilir (STM, 2015). Şekil 2.3’te stereolitografi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 2.3 Stereolitografi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci(Anonim 2021a’ dan değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.1.2 Lamine Nesne Üretimi(Sheet Lamination)

Lamine Nesne İmalatı, sıralı döngüsel istifleme, yapıştırma ve malzeme tabaka katmanlarını istenen şekle getirme yoluyla farklı geometrik şekil ve boyutta parçalar oluşturan eklemeli üretim sürecidir. Katman istifleme, malzemeyi platforma iletmek için bir rulo aracılığıyla gerçekleştirilir. Daha sonra alt tabakaya yapıştırma işlemi önceden şekillendirilir ve sıcak plaka ile basınçlandırma veya merdane ile sıcak laminasyon uygulanır. Bitmiş parça pürüzsüz bir yüzeye ve iyi bir mukavemete sahiptir. Ayrıca, parça laminasyona devam etme kabiliyetine sahiptir, bu da kırık parçaları onarmak veya mevcut parça yüzeyi üzerine yazdırmaya devam etmek için bir avantaj oluşturmaktadır (Vladinovskis, 2020). Şekil 2.4’ te lamine nesne üretimi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci şematik olarak anlatılmıştır.

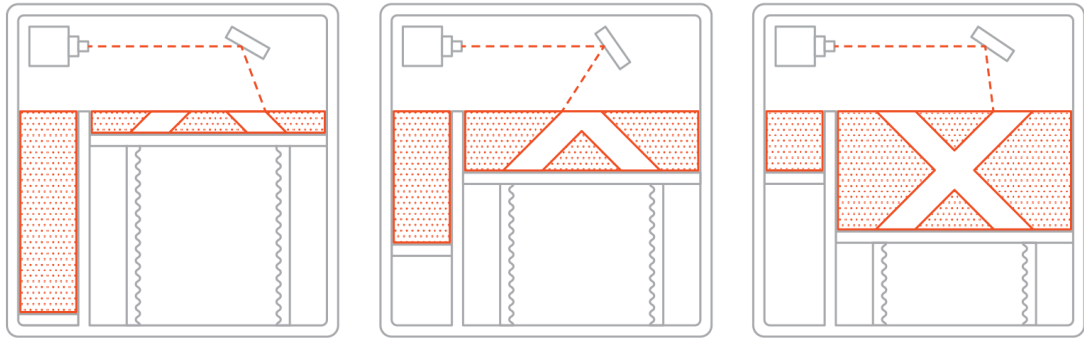


Şekil 2.4 Lamine nesne üretimi tipi eklemeli imalat yöntemi süreci (Parupelli, S., ve Desai, S. 2019’ den değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.1.3 Toz Yatak Kaynaştırma(Powder Bed Fusion)

Toz yatak kaynaştırma imalat yöntemi, bir yatak üzerinde bulunan toz tabakası üzerine 3B modelleme programı tarafından daha önceden belirlenmiş kesit veya katmanları lazerleme işlemi yapılarak toz halindeki malzemeyi seçici olarak kaynaştırması metodu ile gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir. 3B modele uygun olarak yapılan lazerli taramanın ardından toz tabaka yine 3B modelleme programında daha önceden belirlenmiş katman miktarı kadar azaltılır. Burada gerçekleştirilen tabaka azaltma yöntemi toz tabakanın üzerinde bulunduğu yatağın hareketi ile mümkündür. Ardından bu süreç tasarlanan objenin tamamlanmasına kadar devam etmektedir (Anonim 2018).

En yaygın kullanılan selective laser sintering SLS malzemesi, Naylon 12 olarak da bilinen Poliamid(PA) 12'dir. PA 11 ve Polieter eter keton(PEEK) gibi diğer mühendislik termoplastikleri de mevcuttur ancak yaygın olarak kullanılmamaktadır. Poliamid tozu, üretilen SLS parçasının mekanik ve termal davranışını iyileştirmek için çeşitli katkı maddeleri (karbon elyafları, cam elyafları veya alüminyum gibi) ile doldurulabilir. Katkı maddeleriyle doldurulmuş malzemeler genellikle daha kırılgandır ve oldukça anizotropik davranışa sahip olabilir (Anonim 2021b). Şekil 2.5' te toz yataklı kaynaştırma tipi eklemeli imalat yöntemi süreci şematik olarak anlatılmıştır.

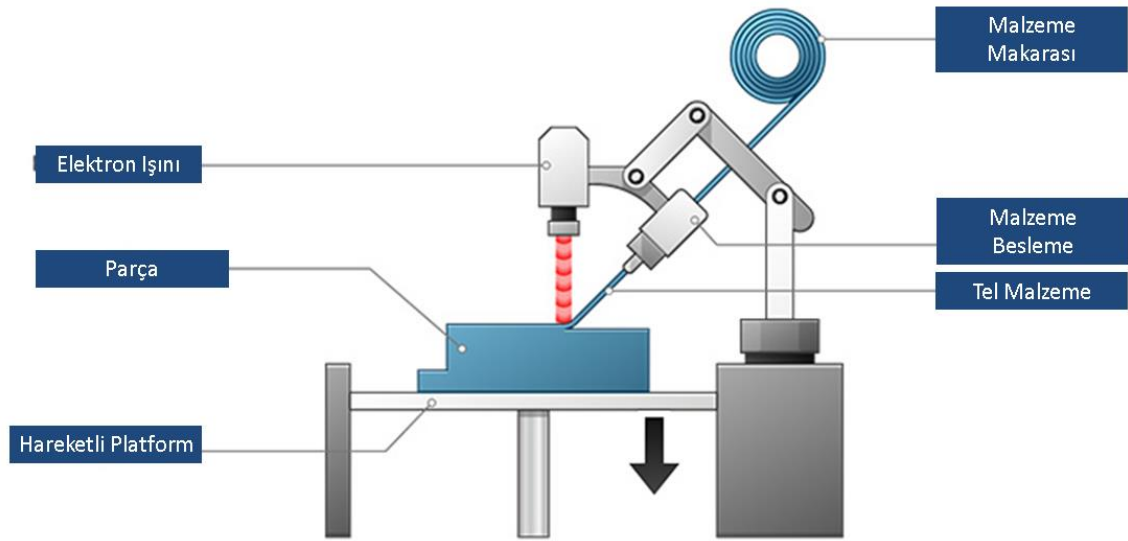


Şekil 2.5 Toz yataklı kaynaştırma tipi eklemeli imalat yöntemi süreci(Anonim 2021b' dan alınmıştır.)

2.2.1.4 Doğrudan Enerji Biriktirme(Directed Energy Deposition)

Doğrudan enerji biriktirme(DEB) yöntemi ile eklemeli imalat, çok eksenli (genellikle 4 veya 5 eksenli) bir kol üzerine monte edilmiş bir nozul aracılığıyla bir taban veya bileşen üzerine malzeme biriktirerek çalışır. Nozüle beslenen metal malzeme ya toz ya da tel şeklinde sağlanır. Bir ısı kaynağı biriktirilirken, genellikle bir lazer, elektron ışını veya plazma arkı kullanarak malzemeyi aynı anda eritir. Bu prosedür, katmanlar katılana ve bir nesneyi tamamlayana veya onarana kadar tekrar tekrar devam eder.

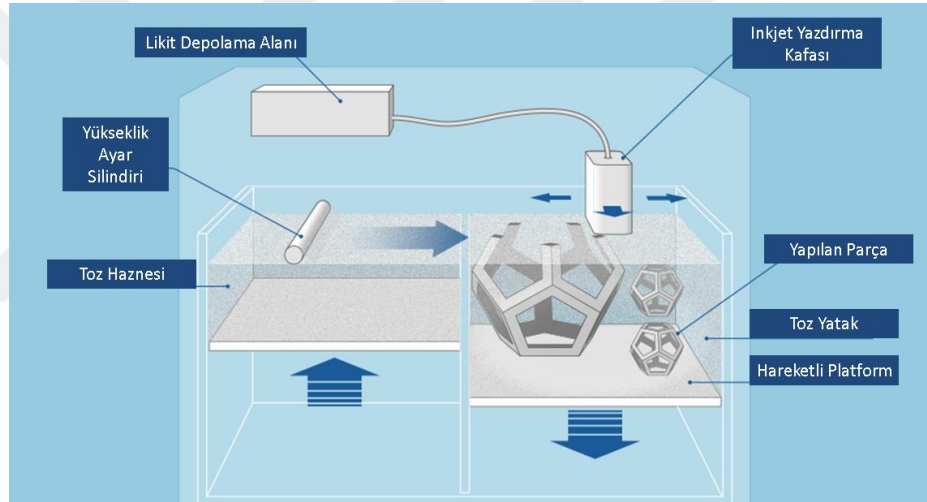
DEB yöntemi genellikle toz veya tel şeklinde metallerle kullanılır. Aynı zamanda DEB yönteminin polimer ile de çalışabilmesi mümkündür (Anonim 2019a). Şekil 2.6’ da doğrudan enerji biriktirme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci şematik olarak anlatılmıştır.



Şekil 2.6 Doğrudan enerji biriktirme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci(Parupelli, S., ve Desai, S. 2019’ den değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.1.5 Yapıştırıcı Malzeme Kullanılarak Katmanlı İmalat(Binder jetting)

Daha çok literatürde kalıp üretiminde kullanılan yapıştırıcı malzemeli eklemeli imalat yöntemi, hazne içerisinde bulunan ana malzeme olarak tabir edilen toz malzeme üzerine geleneksel mürekkepli yazıcılardaki mürekkep püskürtme teknolojisine benzer bir şekilde belirlenmiş eksenler arasında hareket eden bir püskürtücü kafa ile yapıştırıcı uygulanır ve üzerine yeni ana toz materyal katmanı serilerek sertleştirilir. Yapıştırıcı malzeme ana bağlayıcı malzeme olmasından dolayı daha kırılğan yapılar ile üretim söz konusudur (Anonim 2018). Şekil 2.7’ de yapıştırıcı malzeme kullanarak katmanlı imalat yöntemi süreci şematik olarak anlatılmıştır ve Şekil 2.8’ de bu yöntem ile üretilen numune ürün gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Yapıştırıcı malzeme kullanarak katmanlı imalat süreci(Parupelli, S., ve Desai, S. 2019’ den değiştirilerek alınmıştır.)

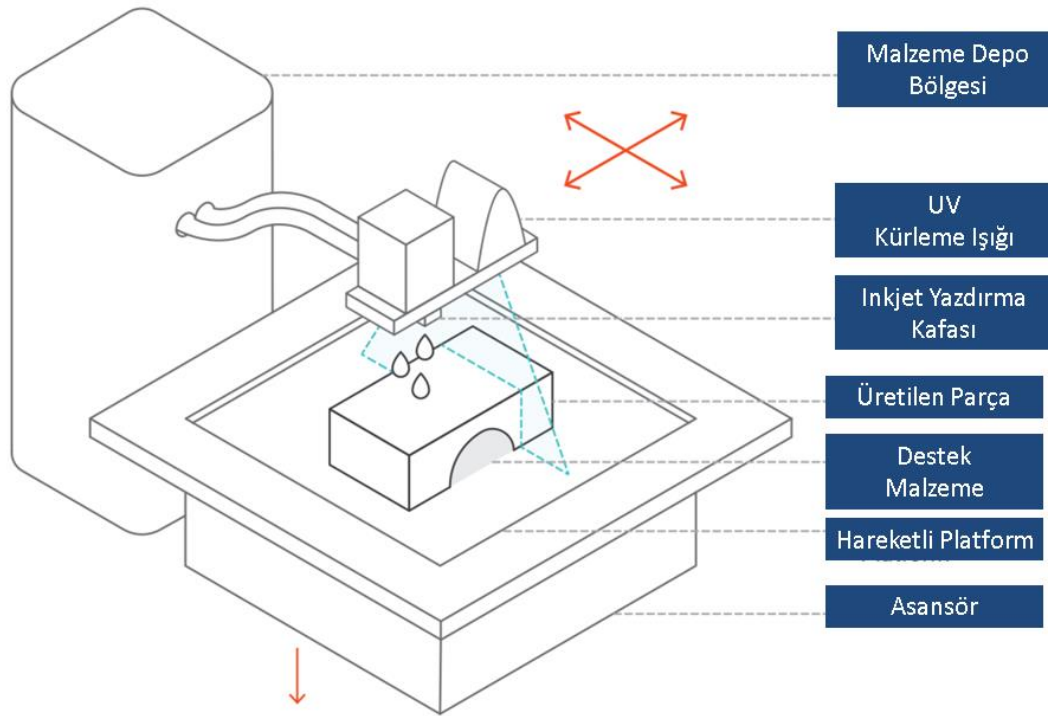


Şekil 2.8 Yapıştırıcı malzeme kullanılarak katmanlı imalat yöntemi ile üretilmiş parça örneği(STM, 2015’ den alınmıştır.)

2.2.1.6 Malzeme Jeti(Material Jetting)

Malzeme jeti(MJ), yapıştırıcı ile katmanlı üretim(BJ-Binder Jetting) çeşidi eklemeli imalat yöntemine benzer şekilde hareketli bir kafadan malzeme püskürtme işleminin yapılması ile üretim gerçekleştirilir. Şekil 2.9’ da malzeme jeti tipi eklemeli imalat yöntemi süreci gösterilmiştir. BJ ile yapılan üretim metodunda toz malzemeye püskürtülen materyal yapıştırıcı iken malzeme jeti üretim metodunda püskürtülen materyal hammaddedir ve hammaddenin sertleştirilmesi ultraviyole ışık altında gerçekleşmektedir. MJ’de kullanılan malzemeler, sıvı halde gelen termoset fotopolimerlerdir(akrilikler).

MJ, özellikleri ve sınırlamaları açısından SLA’da kullanılanlara benzer termoset fotopolimer reçineleri kullanır (kırılgandırlar, düşük ısı sapma sıcaklığına sahiptirler ve sürünmeye duyarlıdırlar). Daha az viskoz, mürekkep benzeri bir formda gelirler ve kilogram başına çok daha yüksek bir maliyete sahiptirler (Anonim 2021c).

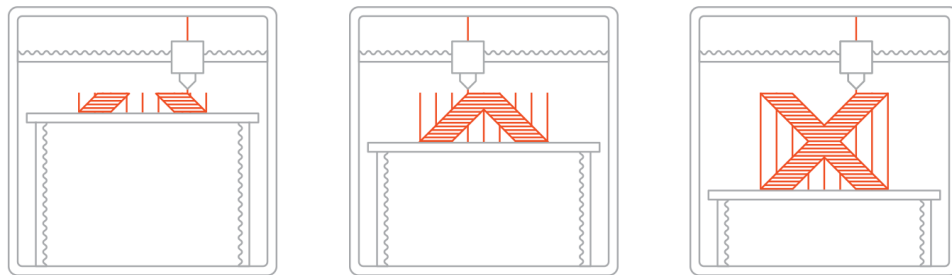


Şekil 2.9 Malzeme jeti tipi eklemeli imalat yöntemi süreci (Anonim 2021d’ den değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.1.7 Eriyik Yığma Modelleme(Fused Deposition Modelling/Material Extrusion)

Günümüzde FDM, endüstri ve ticari olmayan kullanıcılar için en popüler 3D baskı teknolojisidir. Eriyik yığma modelleme teknolojisi, ısıtılmış nozüle beslenen polimer eriyikleri veya polimer filamentleri kullanır. Filament veya eriyik, 3B nesne oluşturmak için nozülden termoplastik ekstrüde edilir. Termoplastik malzeme, ısıtıldığında yarı sıvı hale gelen ve soğuduğunda katı hale gelen bir materyal olması sayesinde bu teknolojiye rahatlıkla kullanılabilir. Extrüde edilen termoplastik bir tabla üzerine ya da termoplastiğin yapışmasına imkan tanıyan başka bir materyal üzerine akıtılarak eriyik yığma modelleme süreci başlatılır (Schirmeister, Hees, Licht ve Mülhaupt, 2019). Tabla üzerine yada bir başka materyal veya parça üzerine başlatılan üretim sürecinin ardından katman katman üretim parça bitene kadar devam etmektedir. Şekil 2.10’ da eriyik yığma modelleme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci gösterilmiş ve Şekil 2.11’ de bu yöntem ile üretilmiş numuneler gösterilmiştir.

Üretim esnasında üç farklı şekilde katmanı tamamlamayı mümkün kılan FDM tipi yazıcılar mevcuttur. Bunlardan bir tanesinde malzemeyi extrüde eden nozzle kafası hareketli olurken tabla sabit durmaktadır. İkinci seçenek FDM tipi üretim yönteminde nozzle kafası sabit iken tablanın hareketli olması durumudur. Son olarak hem nozzle kafasının hem de tablanın hareketli olduğu FDM tipi yazıcılar da mümkündür.



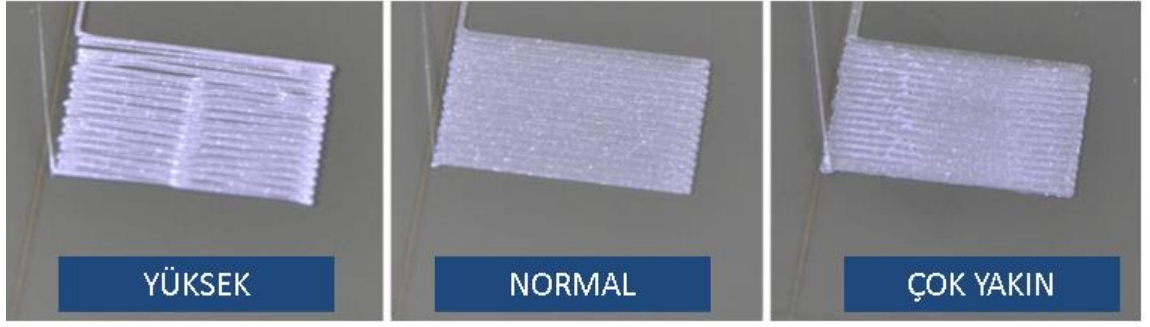
Şekil 2.10 Eriyik yığma modelleme tipi eklemeli imalat yöntemi süreci(Anonim 2021e’ den alınmıştır.)



Şekil 2.11 Eriyik yığma modelleme tipi eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş örnek parçalar(Anonim 2021f’ den alınmıştır.)

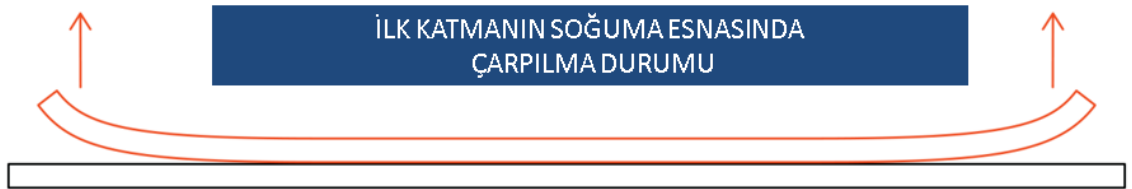
FDM tipi yazıcılarda yapılan üretimlerde karşılaşılabilen birçok üretim problemleri mevcuttur. Bu problemler genellikle kullanılan hammadde ve yazıcının donanımsal özelliklerinden kaynaklanabilmektedir. Genellikle karşılaşılan en sık problemler arasında extrüde edilen filamentin ilk katmanda tablaya yapışmaması ve bu yapışmamadan kaynaklı olarak üretimin katmanlı olarak devam edememesi gelmektedir. Bu problem öncelikle kullanılan materyalin çeşidine bağlı olarak malzemenin tabla ile arasında oluşan adezyon bağının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Adezyon bağını arttırabilmek ve düzgün bir üretim yapabilmek adına extrüde edilecek olan tablanın ısısının filamentin çeşidine göre arttırılması, ilave yapıştırıcı materyal kullanılması yada ilk katman için extrüzyon oranının arttırılması gibi çözümler mevcuttur.

Bir diğer sebep ise nozzle ile tabla arasındaki mesafe ayarının düzgün bir şekilde yapılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple ilk katmanın düzgün bir şekilde başlayıp devam edebilmesi için ilk katman yükseklik ayarının yapılması oldukça önemlidir. Şekil 2.12’ de farklı ilk katman yükseklik ayarına sahip numunelerin görselleri gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Farklı ilk katman yüksekliğine sahip çıktı örnekleri (Anonim 2021g’ den değiştirilerek alınmıştır.)

Üretim esnasında karşılaşılabilecek bir diğer problem ise yeterli adezyon kuvvetinin oluşturulmasına ve düzgün bir ilk katman elde edilmesine rağmen üretim sürecinin ilerleyen safhalarında parçanın tabladan kısmi şekilde ayrılması problemidir ve bu olay çarpılma olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.13’ de çarpılma olayı şematik olarak gösterilmiştir ve Şekil 2.14’ de ABS materyali ile basılmış bir parçada gerçekleşen çarpılma gösterilmiştir. Çarpılmanın başlıca nedenleri arasında kullanılan materyalin cinsine bağlı olarak proses gereği yüksek sıcaklıklara getirilen malzemenin hızlı soğutulması bulunmaktadır. Ayrıca eriyik yığma modelleme sürecinde ortam koşulları da çarpılmaya etki edebilmektedir. FDM tipi yazıcılarda üretim yapılırken yazıcının termal olarak ortamdan yalıtılması, ısı ve nem dengesinin sağlanması hem ürünün çarpılması açısından hemde mekanik değerlerin etkilenebilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

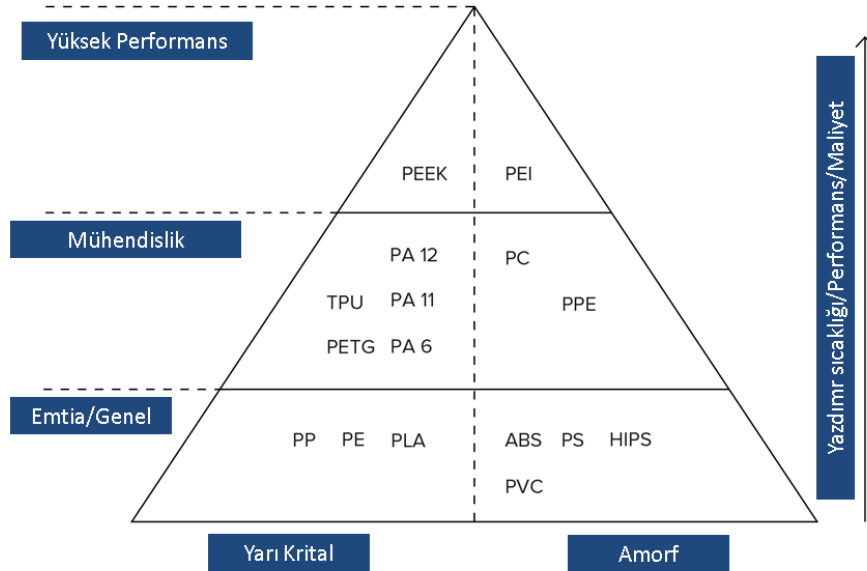


Şekil 2.13 Şematik bir şekilde parçanın tabla üzerindeki çarpılması örneği (Anonim 2021e’ den değiştirilerek alınmıştır.)



Şekil 2.14 ABS materyali ile basılmış bir parçada gerçekleşen çarpılması örneği(Anonim 2021e’ den alınmıştır.)

FDM'nin temel güçlü yönlerinden biri de, çok çeşitli malzemelerin kullanılabilmesine olanak tanıyan bir teknoloji olmasıdır. Kullanılan bu malzemeler, Polilaktik Asit(PLA) ve Akrilonitril Butadien Stiren(ABS) gibi ticari termoplastiklerden, Poliyamid(PA), Termoplastik Poliüretan(TPU) ve Polietilen Tereftalat Glikol(PETG) gibi mühendislik malzemelerine ve Polietilen Eter Keton(PEEK) ve Polietilenimin(PEI) gibi yüksek performanslı termoplastiklere kadar değişebilir (Anonim 2021e). Şekil 2.15’ de yazdırma teknolojisinde kullanılan plastiklerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.15 FDM tipi yazıcılarda kullanılan malzemeler(Anonim 2021e’ den değiştirilerek alınmıştır.)

2.3. Eriyik Yığma Modelleme Mateyali Olarak Polietilen Tereftalat Glikol

PETG, eklemeli imalat yönteminde kullanılan polietilen tereftalat(PET) 'ın en çok karşılaşılan şeklidir. G harfi, glikolün(G) modifiye edilmiş olduğunu temsil etmekte ve bu şekliyle, yeni reçinenin eski ham PET'ten daha az kırılğan olmasını sağlamaktadır. Hammade olarak tek başına PET değerlendirildiğinde genellikle eklemeli imalat için kullanılamaz. PETP, PETT, PETE ve PET-P, Polietilen tereftalatın üzerinde değişiklikler yapılmış versiyonlarıdır (Anonim 2021h). PLA ve ABS filamentlerine kıyasla daha parlak bir görünüme sahip olan PETG malzemesi PLA' dan daha yüksek çekme dayanımı değerlerine sahip iken ABS ile kıyaslandığında daha yakın veya bir miktar daha az çekme dayanımına sahiptir. Ancak ABS filamentlerinde karşılaşılan en büyük problemler arasında olan toksik gaz salınımı gibi bir yan etkisi bulunmamakla birlikte üretim esnasında daha az çarpılma gözlemlenmektedir. Şekil 2.16' da PETG filament örneği gösterilmiştir.

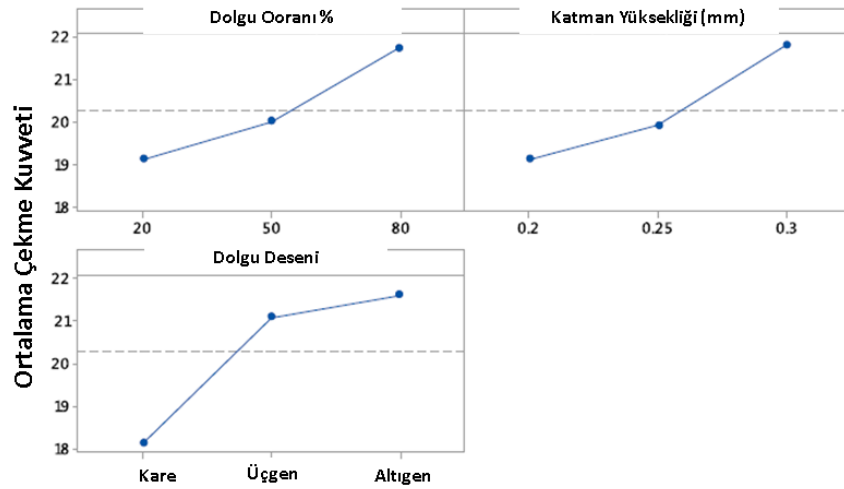


Şekil 2.16 Polietilen Tereftalat Glikol örnek filamet görseli(Anonim 2021i' den alınmıştır.)

3B üretim için yaygın olarak kullanılan polimerler ABS ,PLA, PA ve High Denstity Polistiren (HIPS)'dir. PETG, bu materyallere göre daha efektif olarak kullanılabilcek olan başka bir materyaldir, ancak literatürde diğer materyallere oranla daha az kullanılmış ve karşılaşılmıştır (Szykiedans, Credo ve Osinski, 2017).

Alternatif bir malzeme olarak PETG, tüketici ve ticari uygulamalarda son derece popüler hale gelmektedir. FDM teknolojisi ile birlikte özelleştirilebilir parçalar, gıda endüstrisi (Gıdaya uygun plastik kap) ve tıbbi alan(zorlu sterilizasyon süreci, implant, tıbbi cihaz paketleme vb.) için kullanılabilecek önemli bir materyal olarak karşımıza çıkmaktadır (Panneerselvam, Raghuraman ve Vamsi, 2021).

Eriyik yığma modelleme ile üretimi gerçekleştirilen PETG malzemesi üzerine yapılan bir çalışmada, FDM üretim parametrelerinin PETG yapısına olan etkileri incelenmiştir. Çalışmaya göre dolgu oranı, katman kalınlığı ve dolgu deseninin nihai ürünün mekanik özelliklerini etkilediğini belirlenmiştir. Çalışmanın neticesinde 0,3mm katman kalınlığı, hegzagonal dolgu deseni ve mümkün olan en yüksek dolgu oranı ile maksimum çekme mukavemeti değeri elde edildiği raporlanmıştır (Panneerselvam, Raghuraman ve Vamsi, 2021). Şekil 2.17’ de Panneerselvam, Raghuraman ve Vamsi’ nin yaptığı çalışmada parametre etkileri gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Panneerselvam ve ark. Tarafından gerçekleştirilen çalışmada parametrelerin çekme dayanımına olan etkisi(Panneerselvam, Raghuraman ve Vamsi, 2021’ dan değiştirilerek alınmıştır.)

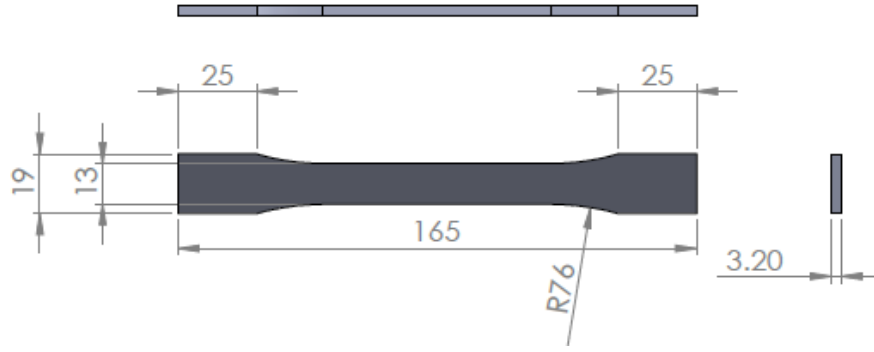
Bu çalışmadan hareketle PETG malzemesinin FDM tipi yazıcılar ile üretimi esnasında, üretim parametrelerine bağlı olarak farklı malzeme özelliklerine sahip olabileceği ve bu sebeple sonlu elemanlar analizi gibi uygulamalarda standart bir malzeme seçimi söz konusu olamayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4. Eklemeli İmalat Test Numunesi

Eklemeli imalat yönteminde metal, kompozit, plastik v.b gibi bir çok malzeme kullanılmakta olup her bir malzemenin spesifik mekanik özellikleri bulunmaktadır. İmalatı yapılacak olan yada yapılması planlanan bir ürünün fonksiyonelliğine göre özellikle ürün tasarımı sürecinde kullanılacak olan malzemenin seçimi oldukça önemlidir. Öyle ki seçilecek olan malzeme zamansal, ekonomik ve mekanik olarak süreci etkileyebilmektedir. Malzeme seçimi sürecinde literatürden faydalanılarak ürünün fonksiyonelliğine göre mekanik ve kimyasal özelliklerine bakılarak karar verilir. Bu özellikler dünya çapında kabul görmüş kurumlar tarafından belirlenen standartlar üzere belirlenmekte ve bu standartlara göre gerçekleştirilen testlerle tespit edilmektedir.

Plastik enjeksiyon ile kalıplama, talaşlı imalat, sac metal kalıplama gibi geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmiş bir çok malzeme için standartlara uygun test ve test numuneleri bulunmaktayken 3B imalat ile üretilen materyaller için bir standart bulunmamaktadır.

American Society for Testing and Materials (ASTM) D638-10 standardı, plastiklerin gerilme özelliklerinin belirlenmesi için beş ayrı numune boyutu (Tip I ila V) sağlar. Standart, alternatiflere göre Tip I numunesinin tercihini önermektedir, ancak FDM teknolojisi ile üretilen parçaların değerlendirilmesinde kullanılmak üzere doğrudan önerilen bir numune tipi belirtmemektedir. 3B baskılı polimer parçaların testi için ASTM / International Organization for Standardization (ISO) protokolleri oluşturulmamıştır. Ancak literatürde yapılan birçok çalışmada ASTM D638 standardından faydalanılmaktadır (bkz. O'Carroll, 2017; Pastor-Artigues ve diğerleri, 2019). Şekil 2.18' de ASTM standardına göre kullanılması gereken numunenin ebatları gösterilmektedir.



Şekil 2.18 Tip I ASTM Çekme Testi Numunesi (O’Carroll, 2017’ den alınmıştır.)

2.5. FDM Proses Parametreleri Ve Bu parametrelerin Üretilen Parçaların Mekanik Özelliklerine Etkisi

Proses parametrelerinin etkisinin, 3 boyutlu yazdırılan parçanın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Polimer malzemeler kullanan bir 3B yazıcıda birçok değişken bulunmakla birlikte bunlardan en etkili olduğu düşünülen yedi adet değişken işlem parametresi bulunmaktadır. Değişken süreç parametreleri ve tanımları Çizelge 2.3’ de görülebilmektedir (O’Carroll, 2017).

Çizelge 2.3 FDM tipi eklemeli imalat için 7 farklı proses parametresi ve tanımları

Katman Yüksekliği	Her bir katman kalınlığını tanımlamaktadır.
Dolgu Yoğunluğu	Basılması planlanan objenin dış kabuğunun içindeki boşluğun doldurulma oranını temsil etmektedir. Bir parça % 100 dolgu oranı ile üretilirse, içi tamamen dolu olacaktır. Dolgu oranı miktarının yüksek olarak belirlenmesi durumunda, üretilen parça o derecede yüksek dayanımlı ve ağır olur. Üretim için daha fazla zaman ve malzeme gerekir.
Yazdırma Hızı	Üretim gerçekleştirilirken yazdırma kafasının yaptığı hareketin hızını belirlemektedir.
Dış Duvar Sayısı(Perimeter)	Eklemeli imalat sırasında önce dış duvar ve ardından iç duvar üretilmektedir ve dış duvar sayısına göre içerideki desenin yönü ve yoğunluğu değişebilmektedir.
Nozzle Sıcaklığı	Hammade olarak kullanılan polimerin extrüde edilirkenki sıcaklığını belirlemektedir.
Örgü Yönü	Obje yazdırılırken belirlenen yazdırma açısını temsil etmektedir. 0° ile 90° arasında değişkenlik gösterebilmektedir.
Örgü Deseni	Bir objenin içine yazdırılan yapı veya deseni ifade eder. Her bir farklı desen, baskı süresi, mukavemet ve malzeme kullanımı arasında avantajlara ve dez avantajlara sahip birkaç farklı dolgu deseni seçeneği vardır.

Torres ve diğerleri (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, yedi değişkeninin PLA ile FDM kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Örnek sayısı, deneylerin Taguchi tasarımı kullanılarak belirlenmiştir.

Deneyler, parametrelerin kombinasyonları ile tanımlanmıştır. Her bir numune, mekanik özellikler üzerindeki her bir parametrenin etkinliğinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilebileceği geniş bir test koşulları yelpazesinde Çizelge 2.4' te belirtilen her parametre için yüksek / düşük bir parametre seçeneği ile tanımlanarak üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, her bir parametrenin önem sırası belirlenmiştir. Çizelge 2.4, olası değerler aralığı ile kullanılan işleme parametrelerini ve test sırasında kullanılan gerçek değerleri göstermektedir.

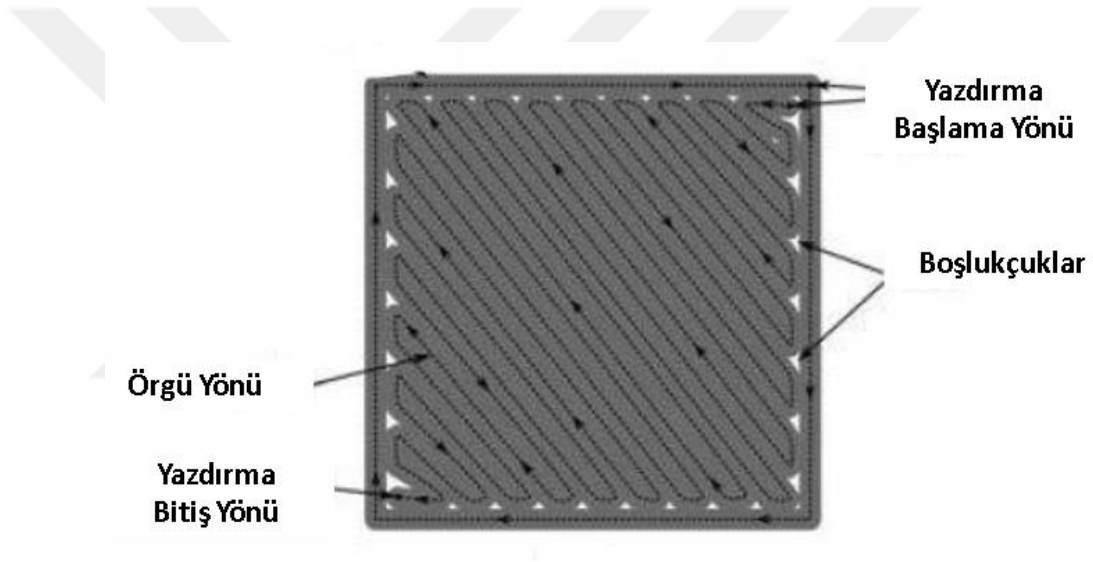
Çizelge 2.4 Torres ve diğerleri (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada belirlenen parametreler ve seviyeleri

Proses Parametresi	Olası Değer Aralığı	Kullanılan Ayar (Düşük/Yüksek)
Sıcaklık(°C)	130-280	215/230
Hız(mm/s)	10-200	60/120
Örgü Yönü(°)	0-180	0/90 ve 45/135
Dolgu Yüzdesi(%)	0-100	35/100
Katman Yüksekliği	0,1-0,1	0,1/0,3
Dış Duvar Sayısı	Kapalı/Açık(Standart Değer)	Kapalı/Açık(Standart Değer)

Çalışmaya göre dolgu yüzdesinin en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Yüksek dolgu yüzdesi ayarı, parçanın kırılmaya karşı daha yüksek bir direnç göstermesini sağlarken, daha yüksek yükleme seviyelerine dayanmasına yardımcı olmuştur. Akma ve kırılma mukavemeti gibi mekanik özellikleri arttırdığı saptanmıştır (Torres, Cole, Owji, DeMastry ve Gordon, 2016).

Yine aynı çalışmada katman kalınlığının en etkili ikinci parametre olduğu bulunmuştur. (Torres, Cole, Owji, DeMastry ve Gordon, 2016). Daha yüksek katman kalınlığı, daha büyük katmanlar üretmekte, bu sayede daha yüksek gerilme mukavemeti elde edilmekte ve kırılma etkilerinin minimuma indiği tespit edilmektedir (O'Carroll, 2017).

Ancak Turner ve Gold (2015) yaptıkları çalışma ile yüksek katman kalınlığına sahip olan numunelerin örgü çizgileri arasındaki boşluğun numunenin mekanik özelliklerine, boyutsal doğruluğuna ve yüzey kalitesine etki edebileceği önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 2.19' da parça içerisinde oluşabilecek hava boşlukları şematik olarak gösterilmiştir.

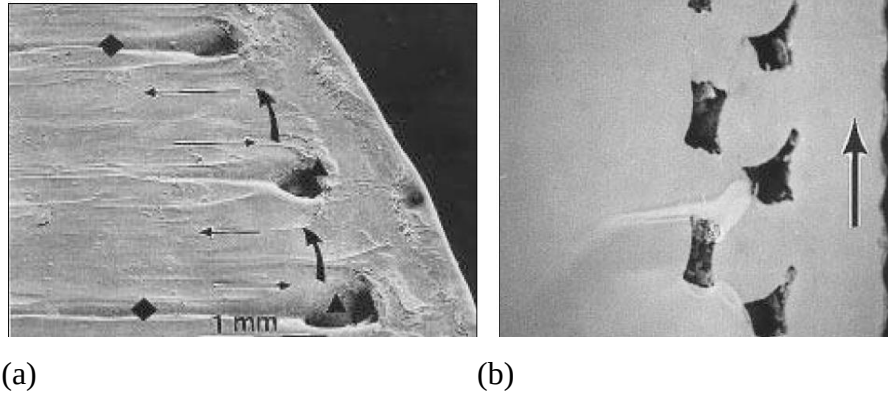


Şekil 2.19 Büyük katman kalınlığına sahip bir parçadaki hava boşluklarının temsili olarak gösterildiği numune kesiti(O'Carroll, 2017' den alınmıştır.)

Torres ve diğerleri (2016) yaptığı çalışmada sıcaklık en etkili 3. parametre olarak bulunmuştur. Torres' in çalışmasında kullanılan 230°C nozzle sıcaklığı Henton ve diğerleri (2005) yaptığı çalışmada belirtildiği üzere çeşitli yapısal özelliklere ve bileşimine bağlı olarak PLA' yı 130 ile 230 arasında olduğu bildirilen erime noktasında tutmaktadır. 215 ° 'lık daha düşük sıcaklıkta ise, düşük sıcaklıkta üretilmesi sebebiyle katmanlar arasında minimum yapışma olduğu düşünülmüştür. Drummer ve diğerlerine göre (2012) ideal sıcaklık malzemenin erime noktasına yakın olmalıdır.

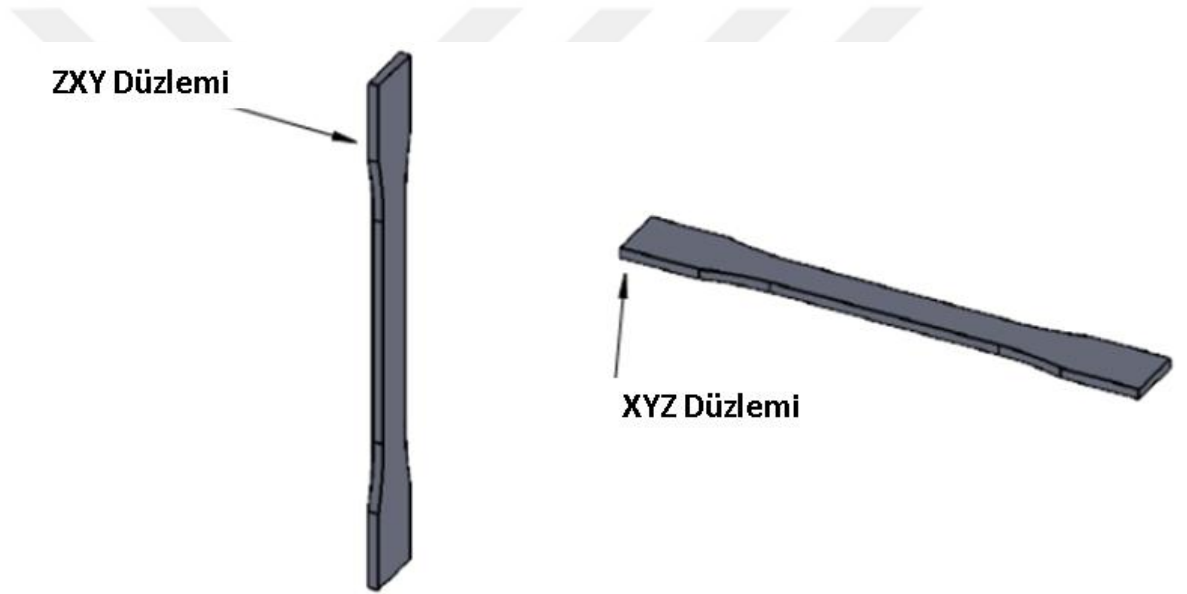
Torres ve diğrleri (2016) dış duvar kalınlığı, mekanik özellikler üzerindeki etkilerde dördüncü sırada yer aldığını tespit etmişlerdir. Daha yüksek dış duvar sayısı ile diğr parametrelerden bağımsız olarak mekanik dayanım kattığı saptanmıştır. Dış duvar sayısı aynı zamanda, dolgu katmanları yönünü takip etmeyip, bileşen kontürü etrafında sürekli olarak sardığından, yükleme yönüne bakılmaksızın mukavemeti ve kırılmaya karşı direnci arttırdığı ve bileşenin kırılma şeklini de etkilediği gözlemlenmiştir.

Torres ve diğrleri (2016), yazdırma hızının parçanın mekanik özellikleri üzerinde çok az etkisi olan bir ayar olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak yazdırma hızı, parçanın yüzey kalitesini etkilemekte ve bu da mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. Yüksek hızlı bir parametre, zayıf bir yüzey kalitesi ile sonuçlanacak ve malzeme içinde kusurlara neden olabilecektir. FDM kullanılarak üretilmiş parçaların yüzey kusurlarını azaltacağı ve daha iyi mekanik özellikler için katkı sağlayacağı için düşük hız ayarı kullanılmalıdır (Agarwala ve diğrleri, 1996). Şekil 2.20’ de yüksek bir hızda basılan parçanın üst yüzeyinde ve kesit alanında oluşturduğu hava boşluklarını göstermektedir. Şekil 2.20’ de SEM altında FDM ile üretilmiş bir parçanın üst yüzeyinde oluşan hava kabarcıklarını göstermektedir.



Şekil 2.20 (a) Scanning electron microscope(SEM) mikroskobu altında FDM ile üretilmiş bir polimer parçanın üst yüzeyini göstermektedir. ve (b) FDM ile üretilmiş bir polimer parçanın kesit alanı(O’Carroll, 2017’ den alınmıştır.)

Torrado ve diğeri (2015), baskı örgü yönünün, numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini karşılaştırmak için XYZ eksen takımında üç farklı örgü yönü test etmişlerdir. Yürütülen çalışmada enine yönün(XYZ düzlem) tercih edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Torrado, ZXY yönünde (dikey) baskı yapmanın, ZXY-yapı yönelimli numuneler için gerilme kuvveti ile aynı yönde sürekli çizgilerin olmamasına neden olduğunu saptanmıştır. Torrado ve Roberson (2016) ayrıca, dikey bir numunenin yazdırılmasının yorucu, zaman alıcı ve bazı durumlarda hiç de mümkün olmadığı kanıtlanmıştır. Şekil 2.21’ de yatay XYZ ve dikey ZXY yapı yönlerinde basılan gerilme testi numunelerinin grafiksel bir temsilini gösterilmektedir.



Şekil 2.21 Farklı pozisyonlarda bulunan numune örnekleri(O’Carroll, 2017’ den değiştirilerek alınmıştır.)

2.6. Taguchi Metodu

Kalite kavramı, uzmanlar tarafından farklı şekillerde tanımlanmış ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan bazıları, kullanım için uygunluk, spesifikasyonlara uygunluk, müşteri memnuniyeti, müşterinin belirtilen ve ima edilen ihtiyaçlarını karşılayan özelliklerin toplamı olarak karşımıza çıkabilmektedir (Krishnaiah ve Shahabudeen, 2012).

Japon bilim adamı Dr. Genich Taguchi, kalite mühendisliği alanına önemli katkılarda bulunmuştur. Kalite felsefesi, kalitenin ürüne göre tasarlanması ve sonrasında muayene edilmemesi gerektiğidir. Yani, kalite kaybı sonrası bir aktivite olan denetim yoluyla kaliteye ulaşılmaz. İkinci felsefesi, kalitenin hedef değerden sapmayı en aza indirerek elde edilebileceğidir. Ürün tasarımı, performansı kontrol edilemeyen (gürültü) faktörlere karşı duyarsız olacak şekilde olmalıdır. Kalitenin maliyetinin hedeften sapmanın bir fonksiyonu olarak ölçülmesi gerektiğini savunmuştur (Krishnaiah ve Shahabudeen, 2012).

Taguchi yöntemlerinin temeli, eklemeli neden-etki modelidir. Bir süreci etkileyen iki faktörümüz (A ve B) olduğunu varsayalım. α ve β sırasıyla A ve B faktörlerinin Y tepki değişkeni üzerindeki etkileri olsun. Taguchi, birçok pratik durumda bu etkilerin (ana etkilerin) eklemeli bir neden-sonuç modeli ile temsil edilebileceğine işaret etmektedir.

Modelin formu şu şekildedir;

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij}$$

μ = Deney bölgesindeki ortalama Y değeri

α_i ve β_j = A ve B faktörlerini etkileyen değerler

e_{ij} = Hata terimi

A gibi ana etki terimi, tek bir süreç veya tasarım parametresine atfedilebilen Y yanıtı üzerindeki etkiyi belirtir. Eklemeli modelde, etkileşim etkilerinin olmadığı varsayılır. Toplamsallık varsayımı ayrıca bireysel etkilerin ayrılabilir olduğu anlamına gelir. Bu varsayıma göre, her faktörün etkisi doğrusal, ikinci dereceden veya daha yüksek mertebeden olabilir. Etkileşimler, tek tek faktörlerin etkilerini katkı yapmaz hale getirir. Etkileşim dahil edildiğinde, model çarpımsal (toplamsal olmayan) hale gelecektir.

Taguchi tarafından önerilen pratik bir yaklaşım, optimum seviyelerinde ayarlanmış faktörlerle bir doğrulama deneyi çalıştırmaktır. Doğrulama deneyinden elde edilen sonuç (gözlemlenen ortalama yanıt), ana etki modeline dayalı tahmin edilen yanıtla karşılaştırılabilirse, katkı modelinin iyi durumda olduğu sonucuna varabiliriz. Daha sonra bu model, elbette deney bölgesinde faktörlerin düzeylerinin herhangi bir kombinasyonu için tepkiyi tahmin etmek için kullanılabilir.

2.6.1 Ortogonal Tasarım

Dr. Genich Taguchi, deneyleri tasarlamak için Ortogonal Dizilerin (OA) kullanılmasını önermektedir. Dr. Taguchi aynı zamanda OA deneylerinin tasarımını basitleştiren doğrusal grafik kavramını da geliştirmiştir. Bu tasarımlar mühendisler / bilim adamları tarafından ileri istatistiksel bilgi edinmeden uygulanabilir. Bu tasarımların temel avantajı, basitlikleri, farklı seviyelerde çok sayıda faktör içeren daha karmaşık deneylere kolay adapte olabilmeleridir. İstenilen bilgiyi mümkün olan en az sayıda denemeyle sağlarlar ve yine de yeterli hassasiyetle tekrarlanabilir sonuçlar vermektedir. Bu yöntemler genellikle ana etkileri incelemek için kullanılır ve tarama / pilot deneylerde uygulanmaktadır. OA deneyleri ile tam faktörlü deneyler arasında yapılan deney sayısı açısından kaynak farkı Çizelge 2.5’ de verilmiştir.

Çizelge 2.5 Ortogonal Dizi ile full faktöriyel dizayn olarak gerçekleştirilen deney sayıları arasındaki farklar

Faktör Sayısı	Seviye Sayısı	Deney Sayısı	
		Fulk Faktöryel	Taguchi
3	2	8	4
7	2	128	8
15	2	32.768	16
4	3	81	9
13	3	1.594.323	27

Ortogonal Diziler (OA'lar), 1897'nin başlarında Fransız matematikçi Jacques Hadamard tarafından kaydedilen matematiksel buluşlardı. Hadamard matrisleri matematiksel olarak Taguchi matrislerine özdeşdir; sütunlar ve sıralar yeniden düzenlenmiştir (Krishnaiah ve Shahabudeen, 2012).

Dizinlerin isimlendirilmesi şu şekilde yapılmaktadır; $L_a(b^c)$

L = Bir dizide, harflerin veya sembollerin aynı satır veya sütunda iki kez görünmemesi için bir harf veya sembol düzenlemesi.

a = Satır sayısı

b = Faktörlerin(parametrelerin) seviye sayısı

c = Faktör(parametre) sayısı

OA ile ilişkili serbestlik derecesi; $OA = a - 1$

Bazı standart OA dizinleri Çizelge 2.6' da gösterilmektedir.

Çizelge 2.6 Bazı standart ortogonal dizinler

İki Seviyeli Seriler	Üç Seviyeli Seriler	Dört Seviyeli Seriler	Karışık Seviyeli Seriler
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{15}(4^5)$	$L_{18}(2^1, 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	$L_{36}(2^{11}, 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$	$L_{81}(3^{40})$	-	-
$L_{32}(2^{31})$	-	-	-
$L_{12}(2^{11})$	-	-	-

$L_8(2^7)$ ortogonal dizisi örnek olarak çizelge 2.8' de verilmiştir.

Çizelge 2.7 $L_8(2^7)$ ortogonal dizisi

Deney Numarası	Kolonlar						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Çizelge 2.7 incelendiğinde, sütun sayısı parametre sayısına, satır sayısı numunesi sayısına tekabül ederken, 1 ve 2 olarak ifade edilen rakamlar ise belirlenen parametrelerinin seviyelerini ifade etmekte ve her bir parametrenin 2 farklı seviyesi olduğu anlamına gelmektedir. Taguchi metodu ile deney aşaması ise adım adım olarak aşağıdaki gibidir:

1. Problemin belirlenmesi
2. Hedefi belirlenmesi
3. Yanıtın ve ölçümünün belirlenmesi
4. Performans özelliklerini etkileyen faktörlerin(parametrelerin) belirlenmesi
5. Tüm faktörler için seviye sayısının ve değerlerinin belirlenmesi
6. Ortogonal dizinin seçilmesi
7. OA sütunlarına faktörlerin atanması
8. Deneyin yürütülmesi
9. Verilerin analiz edilmesi
10. Sonuçları yorumlanması
11. Önemli faktörlerin optimum seviyelerinin seçilmesi
12. Bir doğrulama deneyinin çalıştırılması

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Malzemesi ve Özellikleri

Bu çalışmada 1,75mm çap ölçüsüne sahip, UZARAS marka polietilen tereftalat glikol malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerinin nem oranına bağlı olarak değişebileceği firma tarafından belirtilmiş olup, temin edilen malzeme nemi alınmış ve içerisinde silika bulunan vakumlu bir paket içerisinde teslim alınmıştır. PETG malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 3.1’ da belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 PETG malzemesinin mekanik özellikleri/Filament testi (Anonim 2019b).

ÖZELLİK	METRİK	BİRİM
GENEL		
Yoğunluk	1.26e3 - 1.28e3	kg/m ³
Akma Dayanımı	4.79e7 - 5.29e7	Pa
Çekme Dayanımı	6e7 - 6.6e7	Pa
Uzama	1.02 - 1.18	% strain
Sertlik(Vickers)	1.41e8 - 1.56e8	Pa
Çarpma Dayanımı(Çentiksiz)	1.9e5 - 2e5	J/m ²
Kırılma Tokluğu	2.11e6 - 2.54e6	Pa/m ^{0.5}
Elastisite Modülü	2.01e9 - 2.11e9	Pa
Thermal		
Max Çalışma Sıcaklığı	51 - 64	°C
Erime Sıcaklığı	81 - 91	°C
Yalıtıcı veya İletici	Insulator	
Spesifik Isı Kapasitesi	1.47e3 - 1.53e3	J/kg °C
Termal Genleşme Katsayısı	1.2e-4 - 1.23e-4	uzama/°C
Eco		
CO2 Ayak İzi	3.22 - 3.56	kg/kg
Geri Dönüştürülebilirlik	Evet	

3.2. Üretim Esnasında Kullanılan FDM Tipi Yazıcı ve Özellikleri

Bu çalışma sırasında TwoTrees marka ve Bluer model FDM tipi bir yazıcı kullanılmıştır. Kullanılan yazıcının özelliklerine göre çıktı kalitesinin değişkenlik gösterebileceği ve çıktı kalitesinin deney sonuçlarını etkileyebileceği göz önünde bulundurularak yazıcı üzerinde bir takım iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.2’ de mevcut haliyle herhangi bir değişiklik yapılmamış olan versiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Standart TwoTrees marka Bluer model FDM tipi yazıcı.(Anonim 2021j’ den alınmıştır.)

Standart tipteki bluer yazıcı üzerinde otomatik tabla ayarını yapabilecek bir sistem mevcut ancak mekanik olarak dengesinin bozulması oldukça kolay bir yapıya sahiptir. Tabla ayarının düzgün yapılmaması durumunda ilk katmanda yapışmama ve katman üzerinde süresizliklere sebep olabilecek kalite hataları meydana gelebilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek adına yazıcıya bir adet kapasitif sensör ilave edilmiş ve yazılımsal olarak gerekli ayarlamaları Marlin üzerinde yapılmıştır. Böylece tabla üzerindeki süresizlikler de dahil olmak üzere tablanın düzlemselliğindeki hatalarında telafisini yazılımsal olarak düzeltmeye imkan sağlanmıştır.

Bir diğ er s ureksizlik nedeni ise standart tipteki bluer yazıcıda 1 adet Z eksen motoru bulunmakta ve bu durum bazen makinenin Z ekseninde yaptığı hareketlerde hareketli kafanın tablaya paralel olarak hareketine engel teşkil etmektedir. Bu durumda üretilen parça üzerinde pürüzlü bir yapı elde edilmektedir. Literatürde hıza bağlı olarak ürün yüzey kalitesinde tespit edilen pürüzlülüğün mekanik özelliklere etki ettiği tespit edilmiştir (Agarwala ve diğerleri, 1996). şekil 3.3’ de Z ekseninden kaynaklanan bir düzensizlik  rneği gösterilmiştir.

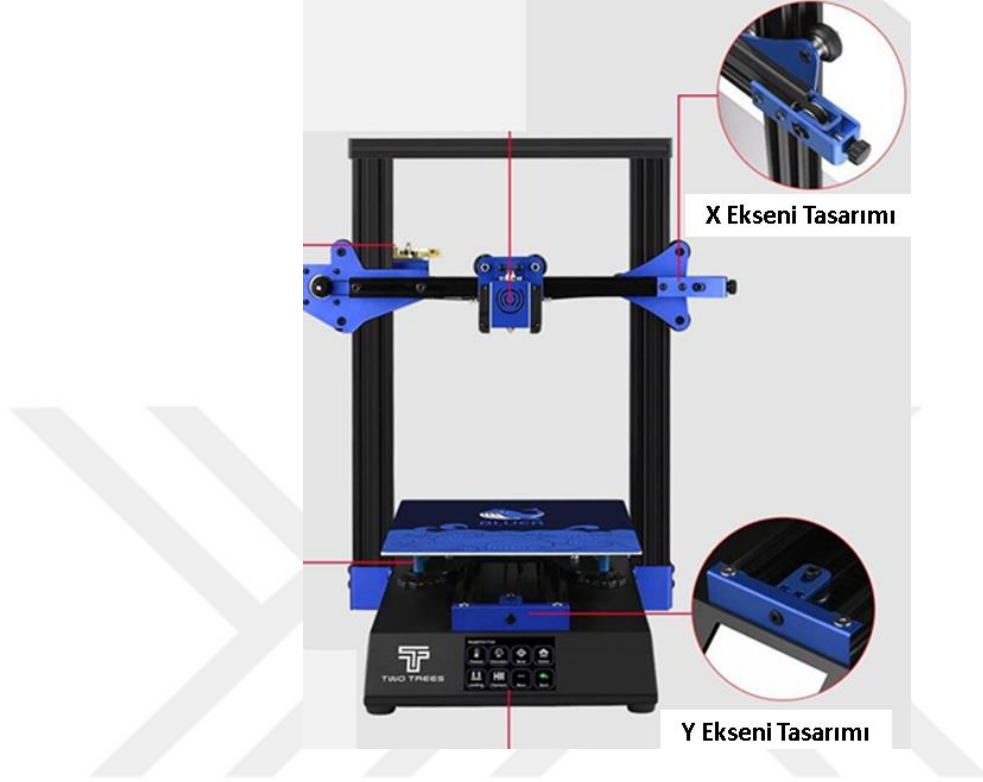


şekil 3.2 Z eksen düzensizliğinden kaynaklanan parça yüzey pürüzlülüğü  rneği(Anonim 2021k’ den alınmıştır.)

Bu durumda yüzeyde meydana gelen bozuklukların önüne geçebilmek adına mevcut durumda 1 adet olan Z eksen motoruna ilave 1 adet motor takılmıştır. Böylece hareketli kafanın yükü 2 farklı motora paylaştırılmış olup, kullanılan yazıcı daha kaliteli çıktılar elde edilebilir bir yazıcı haline getirilmiştir.

Standartta kullanılan yazıcıda X ve Y eksenlerinde hareket kayış kasnak mekanizmasının sağladığı tahriğin tekerlere aktarılması ile sağlanabilmektedir. Alüminyum ekstrüzyon profiller üzerinde hareket eden bu tekerlekler sayesinde kolayca hareket sağlanabilmekte ancak kauçuk tekerlerin yüzey formunun zamanla bozulması veya alüminyum profiller üzerinde oluşabilecek p r zl l klerden kaynaklı olarak X ve

Y eksenlerindeki hareketli durumlar süreksizlikler yaşanabilmektedir. Şekil 3.4’ te mevcut durumdaki X ve Y eksenleri tasarımları gösterilmiştir.



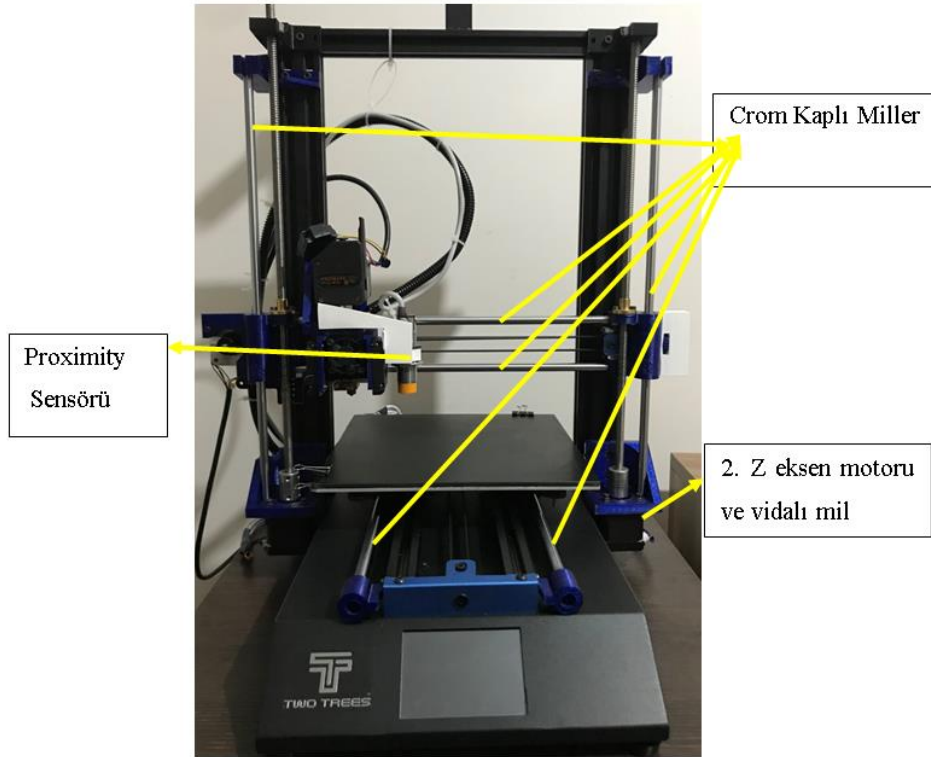
Şekil 3.3 Standart durumdaki twotrees bluer FDM tipi yazıcının X ve Y eksen tasarımları (Anonim 2021j’ den değiştirerek alınmıştır.)



Şekil 3.4 Deforme olmuş bir tekerlek ve yataklama elemanı olarak plastik burç kullanılan mil(Anonim 2021m ve Anonim 2021n’ den alınmıştır.)

X-Y düzleminde yaşanabilecek düzensizliklerin önüne geçebilmek adına ilave aparat tasarımları yapılmış ve paslanmaz crom kaplı lineer miller özel tasarım bu aparatlar ile yazıcıya montaj edilmiştir. Hareket miller üzerinde lineer rulmanlar ile sağlanmaktadır. Hassas yataklama yapılması gereken X-Y düzleminde kullanılan millerde yataklama ise özel olarak tasarlanmış ve 3B yazıcıdan PLA malzeme kullanılarak üretilmiş burçlar ile sağlanmıştır. Şekil 3.5’ te mevcut haliyle kauçuk tekere sahip bir printer’ın zamanla deforme olmuş tekeri ve bu deformasyonun oluşturabileceği olumsuz etkileri minimize edecek lineer rod kullanımında kullanılan özel tasarım burçlar gösterilmiştir.

Modifiye edilmiş verisiyonuyla birlikte kullanılan yazıcının 0°C - 260°C sıcaklık aralığına sahip bir extrüzyon kafası, 0°C - 110°C sıcaklık aralığına sahip ısıtıcı tabla, otomatik tabla ayarını yapabilen kafasitif sensör, Z ekseninde yaşabilecek süreksizliğin önüne geçebilecek ilave 1 step motoru ve terkerlerden kaynaklı X-Y düzleminde yaşanabilecek süreksizliklerin önüne geçebilecek lineer çubuk ve plastik burç donanımları mevcuttur. Şekil 3.6’ da modifiye edilmiş Twotrees bluer gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Modifiye edilmiş Two Trees Bluer

3.3. Deney Numunelerinde Kullanılan Parametreler

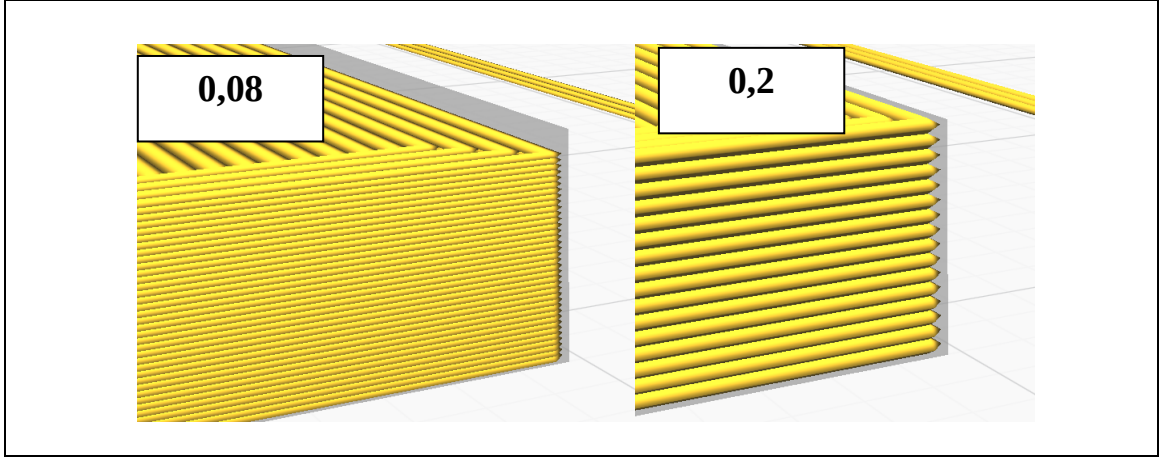
Maksimum çekme dayanımının elde edilmesini amaçlayan bu çalışmada birçok deney sonuçlarını etkileyebilecek etkenler bulunmakla birlikte literatür taraması sonucunda en çok dikkate alınması gereken faktörler tespit edilmeye çalışılmış ve bu araştırma sırasında bazı limitlerle karşılaşmıştır. Literatürde PLA cinsi malzeme için yapılan çalışmalardan da faydalanılarak belirlenen parametreler ve seviyeleri Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Belirlenen parametreler ve seviyeleri.

Parametreler	Seviyeler
Nozzle Sıcaklığı	235°C-260°C
Katman Yüksekliği	0,08 mm - 0,2 mm
Soğutucu Fan	%0 - %100
Çizgi Kalınlığı	0,2 mm - 0,4 mm
Duvar Örtüşme Oranı	%20 - %100
Yazdırma Hızı	25 mm/s - 100 mm/s
Örgü Yönü	0° - 90°

Nozzle sıcaklığı belirlenirken bu çalışmada kullanılan materyal olan PETG’ nin distrübütörünün tavsiye ettiği sıcaklık aralığı ele alınmıştır. 230°C ile 260°C aralığında kullanımı tavsiye edilen malzeme için 100mm/s gibi yüksek bir baskı hızı belirlendiği için ve nozzle ısısının üretim esnasında dalgalanabilmesi göz önünde bulundurularak alt limitin 235°C olarak belirlenmesinin daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür (Anonim 2021o).

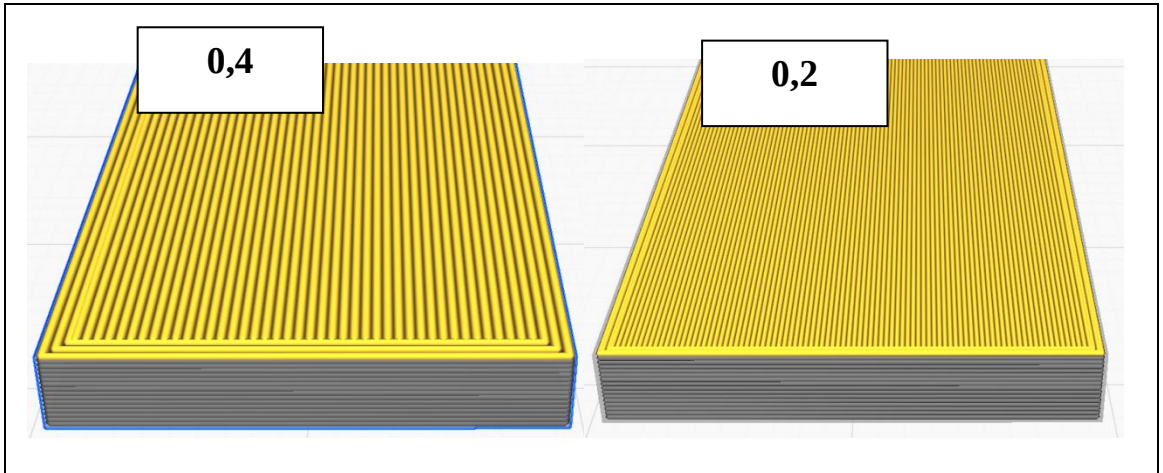
Katman yüksekliği belirlenirken kullanılan nozzle ucunun çapı dikkate alınırken, aynı zamanda Z eksenini hareket ettiren step motorların da adım sayısı dikkate alınmıştır. Doğru ölçüde numune üretimi için step motorlarının bir adımdaki dönme miktarının ve bu tahrik ile dönen trapez vidanın adımı dikkate alınarak katman yüksekliği belirlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda minimum katman yüksekliği 0,08 mm olarak ve maksimum katman yüksekliğinin ise 0,2mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.7’ de farklı katman yüksekliklerine sahip 2 farklı numune gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Farklı katman yüksekliklerine sahip numuneler.

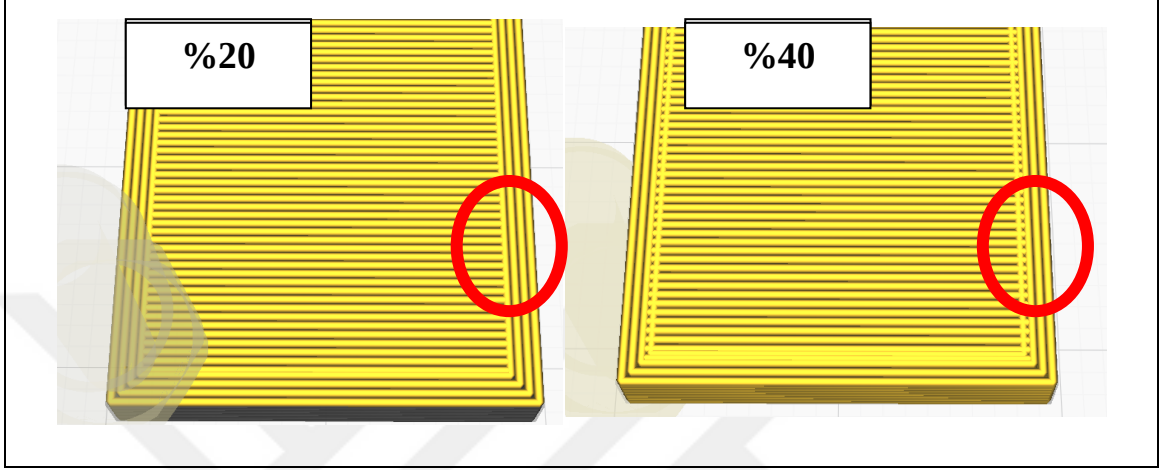
Soğutucu fan hızının numuneler üzerindeki etkisinin maksimum ve minimum değerlerinde görebilmek adına minimum çalışma oranı %0 iken maksimum çalışma oranı %100 olarak belirlenmiştir.

Çizgi kalınlığı belirlenirken kullanılan nozzle çapı oldukça önemlidir. Bu çalışmada kullanılan nozzle 0,4mm çap ölçüsüne sahiptir ve bu çap ölçüsü dikkate alınarak belirlenecek olan çizgi kalınlıkları ölçüsü minimum 0,2mm iken maksimum 0,4mm' dir. Şekil 3.8' de çizgi kalınlıklarının baskı sırasındaki görseli belirtilmiştir.



Şekil 3.7 Farklı çizgi kalınlıkları belirlenmiş olan numuneler.

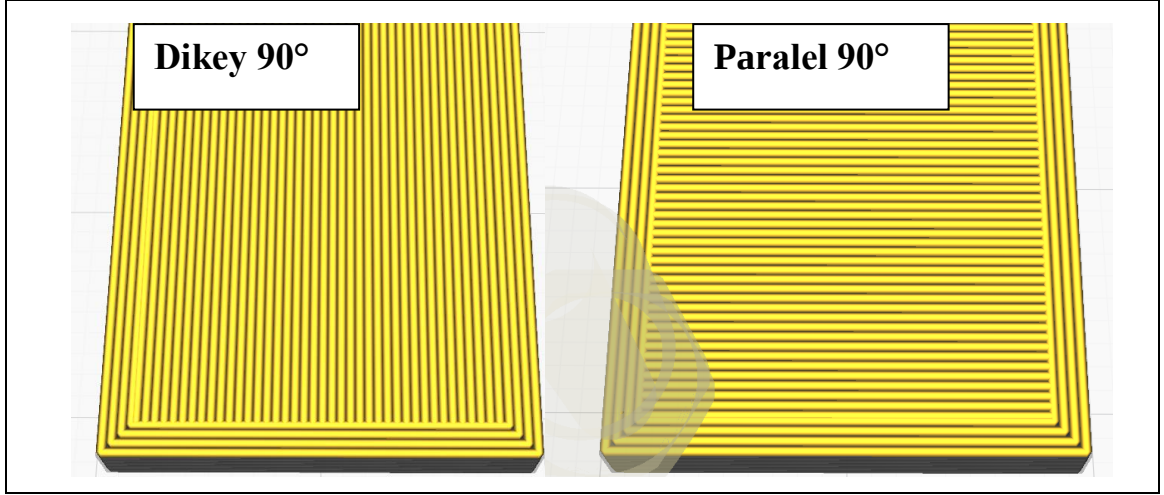
Duvar örtüşme oranı, iç dolgu çizgilerinin dış çevre kontür içerisine kesişme oranı olarak tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada örgü örtüşme oranı minimum %20 maksimum ise %100 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.9’ da farklı örgü örtüşme oranlarını gösteren bir görsel bulunmaktadır.



Şekil 3.8 Farklı örgü örtüşme oranlarına sahip numuneler

Yazdırma hızı belirlenirken hem kullanılan malzemenin yazdırma hızı limitleri hem de kullanılan yazıcının limitleri dikkate alınmıştır. Kullanılan PETG malzemesinin yazdırma hızı limitleri 25 mm/s ile 100 mm/s arasındadır. Yazıcının teknik özellikleri dikkate alındığında ise 10mm/s ile 200mm/s arasında bulunmaktadır. Malzemenin limitleri, makinenin limitlerine göre daha dar aralıkta olduğu için malzemenin limitleri dikkate alınarak 25mm/s ile 100mm/s olarak belirlenmiştir.

Literatür taraması yapıldığında minimum ve maksimum malzeme dayanımı örneklerinin 0° ile 90° yönlerinde olduğu tespit edilmiştir (bkz. Dolzyk ve Jung, 2019). Taguchi yönteminde net bir kalite kavramını belirlemek adına aradaki açı değerleri dikkate alınmamıştır. Bu sebeple literatüre de bağlı kalarak 0°(dikey) ile 90°(yatay) örgü yönleri sırasıyla minimum ve maksimum olarak belirlenmiştir. Şekil 3.10’ da 0° ile 90° örgü yönlerine sahip 2 farklı numune gösterilmektedir.

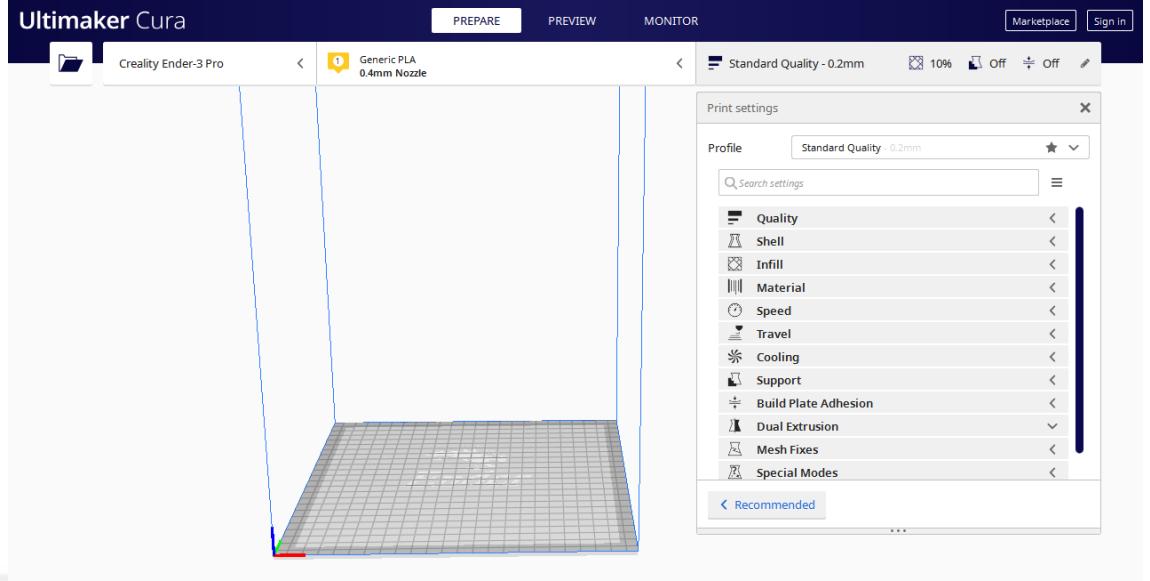


Şekil 3.9 Farklı örgü yönlerine sahip numuneler

3.4. Deney Tasarımının Oluşturulması ve Numune Üretimi

Çekme dayanımını maksimum değerde bulmayı amaçlayan bu çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilecek olan numuneler ASTM D638 standardına bağlı kalınarak üretilmiştir. Çekme numuneleri üretilirken sabit bir geometri kullanılmasına rağmen belirlenen parametreler dikkate alınarak farklı üretim dataları oluşturulmuştur. Parametrelerin seviyelerini optimum değerde bulmayı amaçlayan bu çalışmada belirlenen 7 ayrı parametre CURA programı yardımıyla üretim sürecine aktarılmaktadır.

CURA programı STL formatındaki bir geometriyi 3B yazıcının algılayıp işleyebileceği bir format olan g-code formatına aktaran ULTİMAKER firması tarafından geliştirilen ve herhangi bir lisans kısıtlaması bulunmayan bir yazılımdır. CURA sayesinde üretimde kullanılabilecek birçok parametreye müdahale edilebilmektedir. Yazılım içerisinde birçok FDM tipi yazıcı için hazır format programlar barındırmakla birlikte, özel programlar oluşturmaya da imkan sağlamaktadır. Şekil 3.11’ de CURA arayüzünün nasıl bir görünüme sahip olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.10 Cura arayüzü.

Belirlenen yedi ayrı parametre ve her bir parametrenin 2 farklı seviyesi dikkate alındığında full faktöryel yöntem ile optimum parametre ve seviyeleri elde edebilmek için $2^7=128$ adet deney numunesi hazırlayıp 128 adet çekme testi yapmamız gerekmektedir. Bu aşamada deney numunesini ve sayısını daha düşük sayıda tutarak yine optimum parametre ve seviyeleri elde edebilmek adına taguchi yönteminden faydalanılmıştır. Taguchi yönteminden faydalanılırken Minitab programının deneme sürümü kullanılmıştır. Minitab programı yardımıyla belirlenen parametreler ve seviyeleri programa girilmiş ve girilen parametre adedi ve seviyelerin adedine göre ortogonal matris seçimi yapılmıştır. Yapılan seçimlerle birlikte Minitab programı ortogonal matrise bağlı kalarak sekiz farklı numuneden oluşan bir deney numunesi grubu oluşturmuştur. Ortogonal matris belirlenirken literatür tarama bölümünde aktarılan ortogonal matris belirleme formülüne göre hareket edilerek aşağıdaki şekilde seçim yapılmıştır.

$$L_a(b^c) \rightarrow L_8(2^7)$$

L = Bir dizide, harflerin veya sembollerin aynı satır veya sütunda iki kez görünmemesi için bir harf veya sembol düzenlemesi.

a = Satır sayısı

b = Faktörlerin(parametrelerin) seviye sayısı

c = Faktör(parametre) sayısı

L8 matrisinin seçilmesinin sebebi, sertbestlik derecesinin $OA = a-1$ formülü ile elde edilmesidir. Yani $a-1 = 7$ adet parametre olabilmesi için $OA=8$ olmalıdır. Bu sebeple L8 ortogonal matris seçimi yapılmıştır.

Belirlenen ortogonal matris olan L_8 matrisi 8 adet deney numunesinin belirlenen parametre ve seviyelerine göre dizilimini otomatik olarak oluşturmaktadır. Her bir satır bir adet numuneyi temsil etmektedir. Çizelge 3.3' de oluşturulan matris görülmektedir.

Çizelge 3.3 Belirlenen parametrelerin L_8 matrisindeki dizilimi

No	Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
1	235°	0,08	0	25	0,2	Dik	20
2	235°	0,08	0	100	0,4	Paralel	100
3	235°	0,2	100	25	0,2	Paralel	100
4	235°	0,2	100	100	0,4	Dik	20
5	260°	0,08	100	25	0,4	Dik	100
6	260°	0,08	100	100	0,2	Paralel	20
7	260°	0,2	0	25	0,4	Paralel	20
8	260°	0,2	0	100	0,2	Dik	100

Dog-bone olarak da tabir edilen numuneler tez içerisinde literatür tarama bölümünde açıklandığı şekilde ASTM standardındaki ölçülere riayet edilerek çalışmaya devam edilmiştir. Catia programı yardımıyla geometrisi çizilen numune datası stl formatın kaydedilmiştir. Üretim parametre optimizasyonu üzerine odaklanılan bu çalışmada

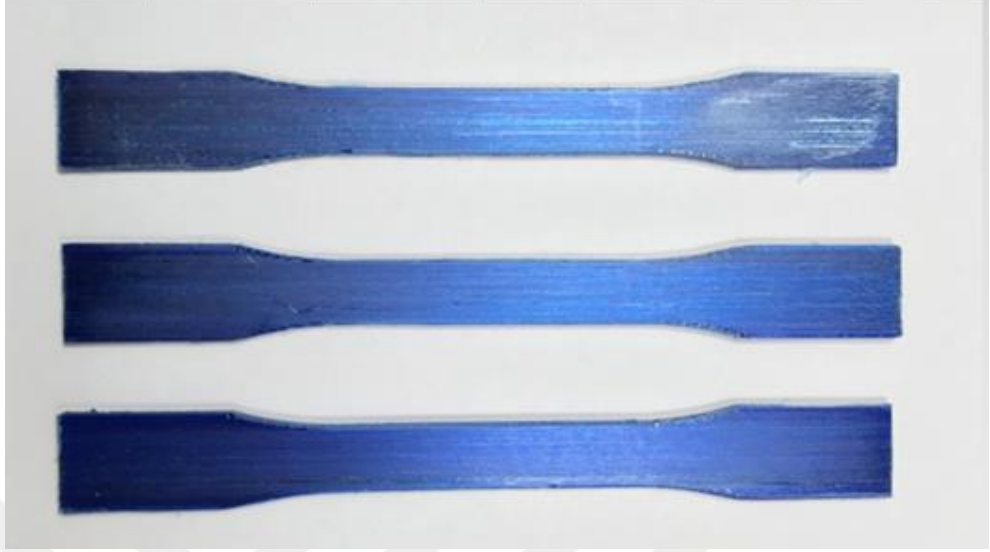
yalnızca 1 adet geometri olması yeterlidir. Numuneler arasındaki farklılıklar CURA programı yardımıyla farklı parametre tanımları yapılarak oluşturulan g-code formatındaki çıktılar ile sağlanmıştır.

Catia yardımıyla geometrisi çizilen ve CURA yardımıyla g-code formatları oluşturulan 8 adet deney numunelerinin üretimleri yazıcıdan alınmıştır. Sonuçların daha doğru yorumlanabilmesi adına her bir deney numunesinden 3'er adet üretilmiş olup çıktıların üretim aşamasındaki görseli Şekil 3.12'de ve üretim sonrası görselleri Şekil 3.13-3.20'de görülebilmektedir.



Şekil 3.11 Üretim aşamasındaki bir numune

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
235	0,08	0	25	0,2	Dik	20



Şekil 3.12 Birinci numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
235	0,08	0	100	0,4	Paralel	100



Şekil 3.13 İkinci numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
235	0,20	100	25	0,2	Paralel	100



Şekil 3.14 Üçüncü numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
235	0,20	100	100	0,4	Dik	20



Şekil 3.15 Dördüncü numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
260	0,08	100	25	0,4	Dik	100



Şekil 3.16 Beşinci numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
260	0,08	100	100	0,2	Paralel	20



Şekil 3.17 Altıncı numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
260	0,20	0	25	0,4	Paralel	20



Şekil 3.18 Yedinci numune serisi

Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı
260	0,20	0	100	0,2	Dik	100



Şekil 3.19 Sekizinci numune serisi

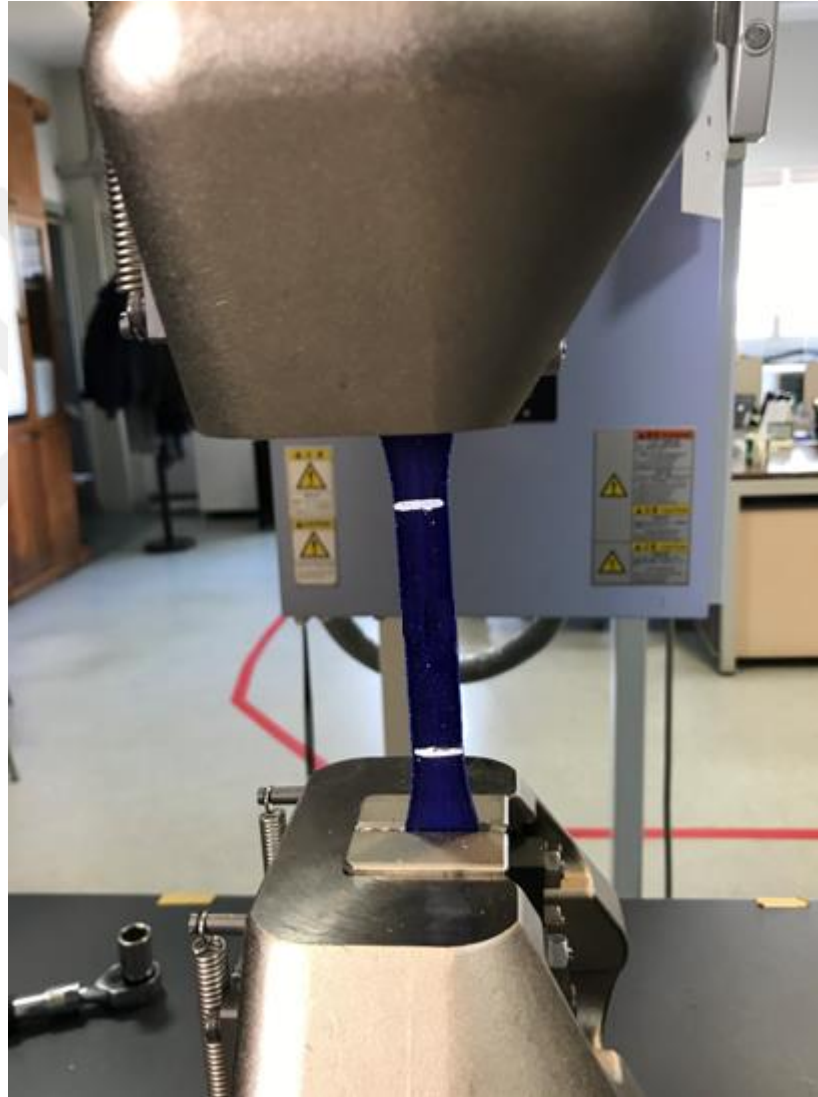
3.5. Çekme Testinin Yapılışı

ASTM D638 standardına uyularak çizilen ve üretilen çekme numuneleri yine aynı standarda bağlı kalarak çekme testine tabi tutulmuşlardır. Dakıkada 5 mm ile yapılan çekme testi için kullanılan cihaz 'Shimadzu Autograph AGS-X 50 kN' dır. Standart haliyle üzerinde 50000N yük hücresi bulunmaktadır. Ancak bu yük hücresi ile yapılan testlerin doğruluğu 5000N ile 50000N arasındaki kuvvetler için söylenebilmektedir. Plastik malzemelerin birçoğunda olduğu gibi PETG malzeme numunelerinin de maksimum kuvvet değerleri 5000N' dan daha yüksek olamayacağı için kullanılan yük hücresi değiştirilerek 5000N yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 3.21' de kullanılan cihaz görülebilmektedir.



Şekil 3.20 Testlerde kullanılan 'Shimadzu Autograph AGS-X 50 kN' çekme cihazı.

Çekme testi esnasında numunelerdeki uzama değerleri ekstansometre yerine bir kamera vasıtası ile ölçülmüştür. Bu nedenle çekme numuneleri üzerine bağlı kalınan ASTM D638 standardında da belirlenen, merkezinden 25mm sağına ve 25 mm soluna olmak üzere 50mm aralığa denk gelecek şekilde, kontrast oluşturacak beyaz çizgiler çekilmiştir. Ardından test cihazına çekme numuneleri için kullanılan ve çene olarak isimlendirilen aparatlara Şekil 3.22' te görüldüğü gibi bağlanmıştır.



Şekil 3.21 Numunenin test cihazına bağlanması.

Çekme cihazında gerçekleştirilecek olan testlerin sonuçlarının doğruluğu açısından çekme cihazına bağlanan numunelerin teste başlamadan önce gerçek ölçülerinin

cihazının kullandığı programa girilmesi gerekmektedir. Aksi halde çekme eğrisi program tarafından standardında geçen ölçüler baz alınarak hesaplanıp, program tarafından çizdirilecektir ki bu eğri gerçek egriden daha farklı sonuçlar verebilir. Gerek sac kalıbı, plastik enjeksiyon veya CNC ile işleme gibi geleneksel üretim yöntemleri ile yapılan imalatlar gerekse eklemeli imalat yöntemlerinde, bitmiş ürünün ölçüleri çoğu zaman CAD ortamında çizilen ölçülerden sapabilmektedir. Bu nedenle her bir numunenin et kalınlığı ve genişliği tek tek ölçülmüş ve programa test öncesinde girilmiştir. Numunelerin ölçüleri Çizelge 3.4’ de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Numunelerin Et Kalınlığı ve Genişlikleri

Numune Numarası	Genişlik	Kalınlık
1,1	13	3,06
1,2	13,13	3,17
1,3	12,87	3,18
2,1	13	3,34
2,2	13,13	3,34
2,3	13,14	3,32
3,1	13,12	3,21
3,2	13,12	3,21
3,3	13,09	3,26
4,1	13,15	3,51
4,2	13,09	3,49
4,3	13,13	3,57
5,1	13,45	3,21
5,2	13,42	3,22
5,3	13,51	3,23
6,1	13,12	3,24
6,2	12,98	3,24
6,3	12,98	3,38
7,1	13,4	3,29
7,2	13,32	3,24
7,3	13,41	3,26
8,1	13,15	3,26
8,2	13,07	3,37
8,3	13,26	3,32

3.6. Sonlu Elemanlar Analizinin Oluşturulması

Bu tez çalışmasında PETG malzemesinin maksimum çekme dayanımını elde edebilmek adına üretim parametrelerinin optimizasyonunu taguchi yardımı ile bulmayı hedeflerken, maksimum çekme dayanımı elde edilmiş malzeme datasını kullanarak örnek bir çalışma ortaya konulmuştur. rnek alışma konusu belirlenirken plastik malzemenin dayanım değerleri dikkate alınarak, yapılan araştırma sonucunda otomotiv pedal kutularında kullanılan eksen pimi seçilmiştir. Mevcut haliyle metal bir malzeme ile kullanılan debriyaj pedal kutusu pimi ele alınırken pim tasarımları değiştirilmemiştir. Malzeme değişikliği yapılması planlanan eksen pimi şekil 3.23’ de gösterilmiştir.



şekil 3.22 Debriyaj pedalı eksen pimi

şekil 3.24’ de örnek çalışmada dikkate alınan debriyaj pedalı gösterilmiştir.



şekil 3.23 Debriyaj pedalı

Simülasyonu yapılacak olan pedal kutularında kullanılan komponentler debriyaj pedal kutusu için şu şekildedir:

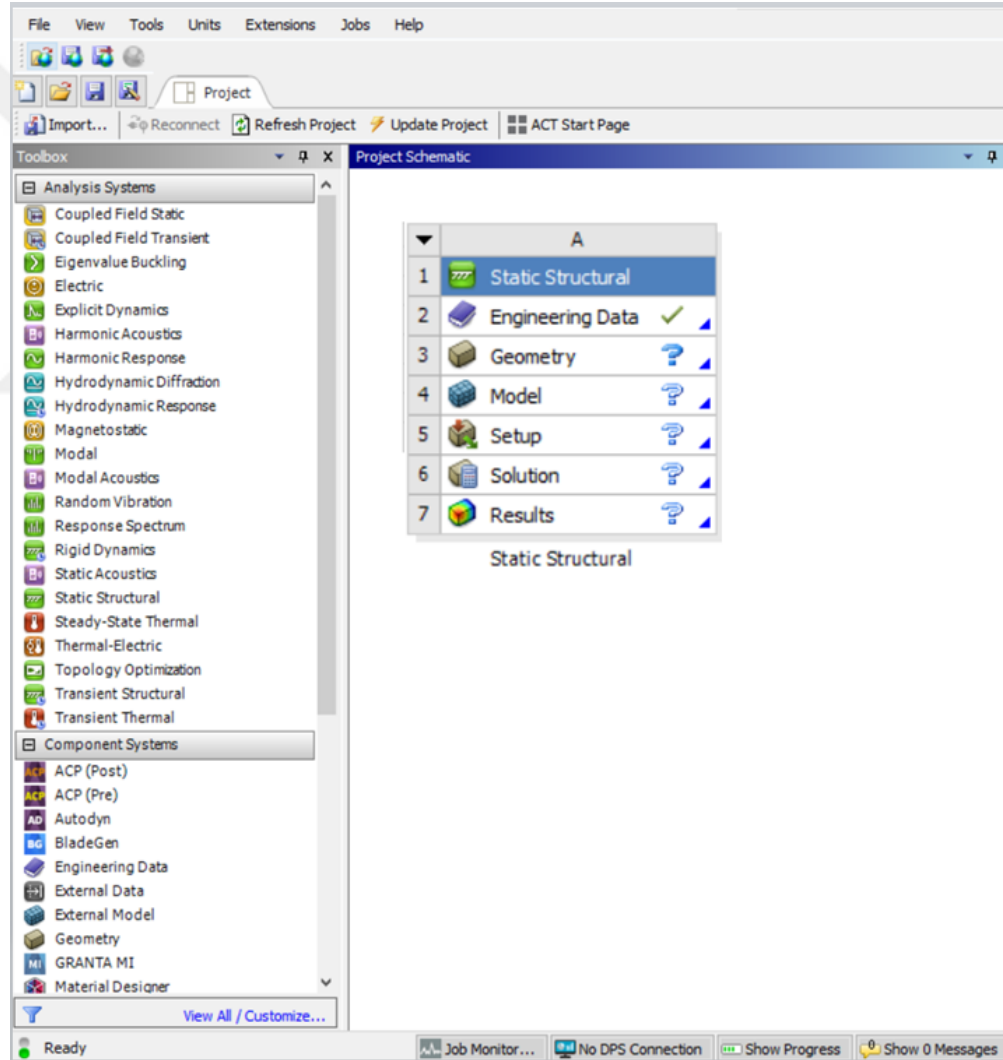
- Ayak basma sacı - S420MC
- Pedal Kolu – S420MC
- Pedal kolunun takıldığı boru parçası – Yapı çeliği
- Boru içerisinde bulunan burçlar – Yapı çeliği
- Burçların altında çalışan 2. boru parçası – Yapı çeliği
- 2. borunun içerisinde çalışan eksen pimi – 20MnB4
- Pedal armının montajlandığı kuleler – S420MC
- Kulelerin montajlandığı zemin sacı – S420MC
- Pedal arm üzerine montajlanmış rotül – Yapı çeliği
- Eksen pimini sabitleyen somun – Yapı çeliği
- Debriyaj pedalının kuvvet uygulandıktan sonrası için geri gelme hareket fonksiyonuna yerine getirebilmek adına kullanılan yay malzemesi yay çeliği,
- Yayın içerisinde çalışan kuvvet yönlendiriciler – Poliamid 6 GF30

Debriyaj pedal kutusunda bulunan S420MC ve 20MnB4 malzemelerinin mekanik özellikleri aşağıda Çizelge 3.5’ de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Debriyaj Pedalında Kullanılan S420MC ve 20MB4 Malzemelerinin Mekanik Özellikleri (Anonim 2014)(Anonim 2021p).

Malzeme Adı	Akma Değeri(Re)	Kopma Değeri(Rm)	Uzama Değeri
S420MC	420 MPa	480-620 MPa	% 16
20MNB4	380 MPa	480 MPa	% 17

Sonlu elemanlar analizi ele alınırken ANSYS yazılımının 2020R2 versiyonu kullanılmıştır. ANSYS içerisinde mekanik, termal, optik analizler yapabilmek mümkün iken bu çalışmada mekanik özellikleri dikkate alınacağı için mekanik kısmı kullanılmıştır. Program içerisinde mekanik tasarımı dikkate alırken farklı modüllerden yararlanılabilir. Zamana bağlı bir simülasyon söz konusu olduğunda dinamik etkileri de ele alabilecek bir çözücünün kullanıldığı explicit dynamics modülü kullanılabilirken pedal kutuları için yapılacak olan çalışma için zamandan bağımsız analizler koşturulacağından dolayı statik modülü kullanılmıştır. Şekil 3.25’ da statik modülü aktif kullanıma hazır bir ANSYS arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Statik modülü kullanıma hazır Ansys arayüzü

Genel olarak statik bir simülasyonu çalıştırabilmek adına öncelikle simülasyonda kullanılan malzemelerin programa tanıtılması gerekmektedir ve bu süreç Şekil 3.29’ da görülen statik modülündeki 2 numara ile belirtilen engineering data kısmından yapılmaktadır. Gerekli malzeme bilgilerinin programa girişinin ardından simülasyonu koşturulacak olan CAD data programa modülde 3 numarada yer alan geometri kısmına aktarılır. Malzeme tanımlaması ve geometri aktarımı yapılan modülde 4 numara ile belirtilen model kısmına giriş yapılarak simülasyonu çalıştırabilmek adına gerekli ayarlamalar yapılır ve simülasyon koşturulur.

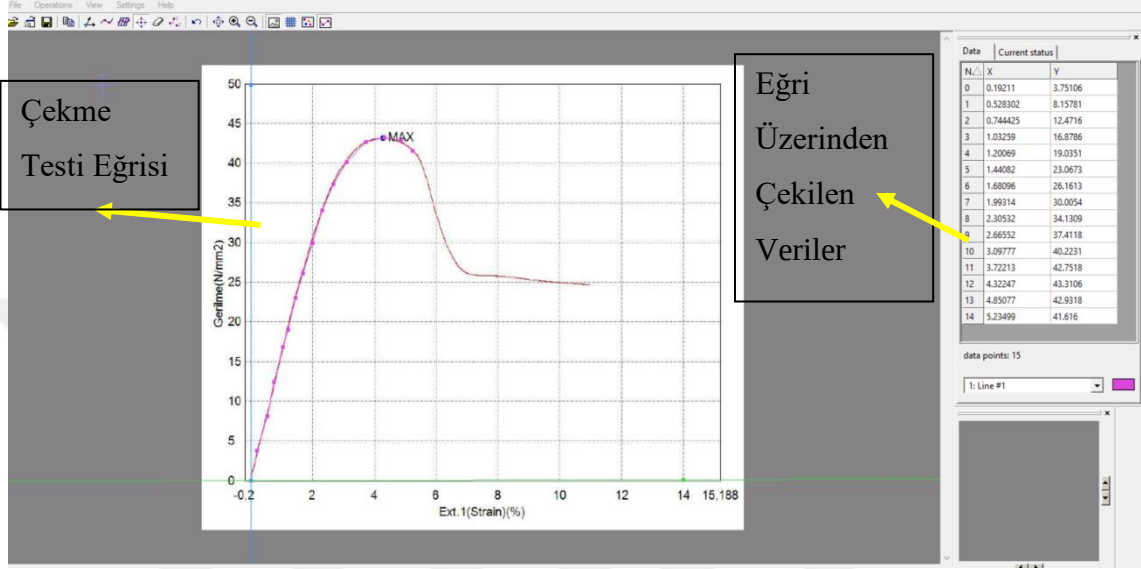
3.6.1. Malzeme Datalarının Tanımlanması

Statik bir simülasyon koşturulmadan önce malzeme tanımlaması yapılırken asgari ihtiyaç duyulan malzeme bilgileri malzemenin elastisite modülü ve poisson oranıdır. Ancak simülasyon yorumu yapılırken parçadaki plastik deformasyon yorumunu yapabilmek adına malzeme akma ve kopma değerlerinin de tanımlanması gerekmektedir.

Ansys malzeme tanımı yapılırken malzeme cinsine göre seçenekler sunmaktadır. Sunulan seçenekler arasında malzemenin izotropik, ortotropik ve anizotropik olma durumları dikkate alınarak 3 farklı seçenek mümkündür. Simülasyonda kullanılan birçok metal ve plastik enjeksiyon parçaları için kullanılan malzemeler izotropik kabul edilmiştir. Çalışmanın asıl odaklandığı konu olan PETG malzemesi ise literatür taramasında Mercado-Colmenero ve diğerleri (2020) yaptığı çalışma dikkate alınarak izotropik kabul edilmiştir. Mercado-Colmenero ve diğerleri FDM teknolojisi ve PETG materyali kullanarak ürettikleri parçaları numerik ve deneysel yöntemlerle ele almış ve X, Y ve Z yönleri için ayrı ayrı gerçekleştirilen denemelerde maksimum %4 hata payı ile aynı sonuçları, malzemeyi simülasyon programında izotropik kabul ederek elde etmişlerdir.

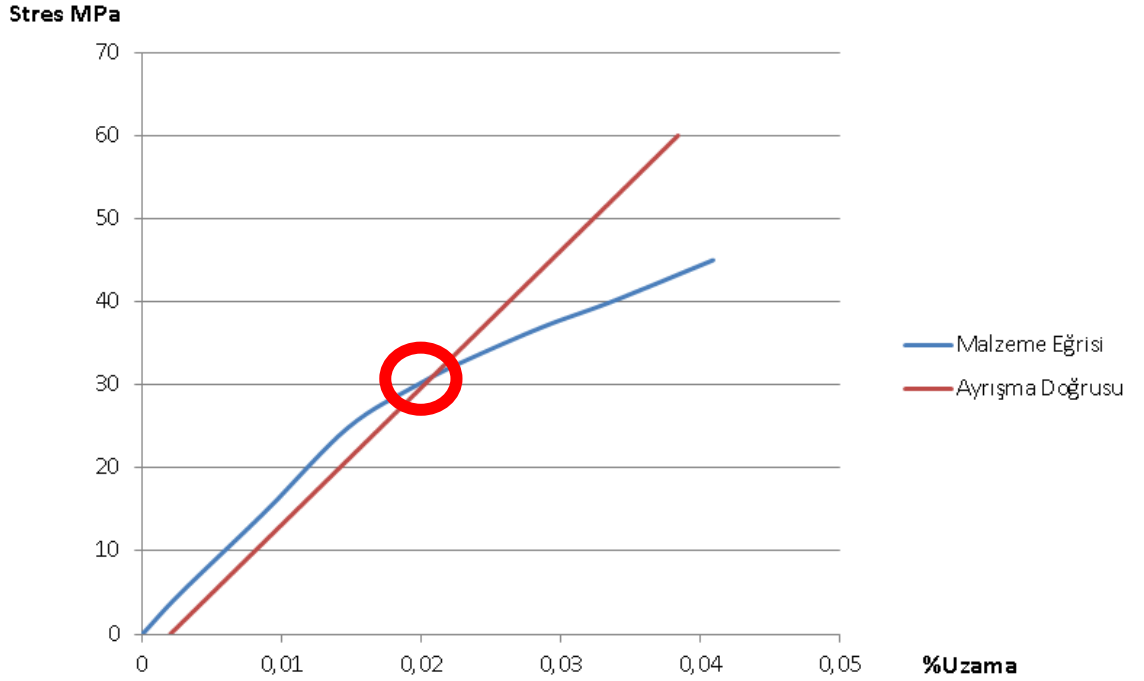
PETG materyali için bulunan maksimum çekme değerinin olduğu malzeme eğrisi verileri ‘GetData Graph’ programı yardımı ile ayıklanmış ve excel’ e aktarılmıştır. GetData Graph programı jpeg formatında kaydedilmiş olan herhangi bir dosya formatı ile çalışabilir ve açılan görsel üzerinde kullanıcı tarafından belirlenen eksen yardımı ile

ekran üzerinde istenen noktanın belirlenen eksen sistemine göre koordinatlarını verir. Bu çalışma da eksen olarak çekme grafiğinin stress ve uzama cetvelleri belirlenmiştir. Şekil 3.26 maksimum çekme eğrisinin üzerinden GetData Graph programı yardımıyla verilerin elde ediliş sürecini göstermektedir.



Şekil 3.25 GetData Graph yardımı ile verilerin elde edilişi

Elde edilen veriler excel ortamına aktarılmıştır. Ansys yazılımı nın şartları gereği simülasyona malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve yalnızca plastik bölgesinin girilmesi gerekmektedir. Poison oranı, Mercado-Colmenero ve diğerleri (2020) yaptığı çalışmada da kabul edilen 0,38 kabul edilmiştir. Elastisite modülü bulunurken excel ortamına aktarılan veriler grafik olarak çizdirilmiştir. Grafiğin % 0,2 noktasından başlayarak, malzeme eğrisinin elastik bölgesinin eğimi ile aynı değere sahip bir doğru çizdirilmiştir. Çizdirilen doğrunun grafik ile ayrıştığı nokta malzemenin akma değeri olarak kabul edilmiştir. Elastisite modülü 1648 Mpa olarak elde edilmiştir. Ayrışmanın gerçekleştiği koordinatlar incelendiğinde akma noktası 30Mpa ve akma noktasındaki uzama miktarı da 0,018mm olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.27’ de elastisite modülünün eğri üzerinden ayrıştığı nokta gösterilmiştir.



Şekil 3.26 Elastisite modülünün malzeme eğrisi üzerinden ayrıştığı nokta.

Elastisite modülü, poisson oranı ve akma noktası belirlenen malzeme datasını ansys' e tanımlayabilmek adına plastik bölgenin verilerini elde edebilmek için akma noktasından önceki veriler silinmiştir. Kalan veriler için ise elde edilen grafikte uzama miktarları elastik ve plastik olarak birliktedir. Bu sebeple plastik bölgeyi yalnız bırakabilmek için toplam uzamadan elastik uzama çıkarılmıştır. Yalnızca plastik bölge elde edilmiş olmasına rağmen eğri hala yetersizdir. Çünkü elde edilen eğri için boyun verme ihmal edilmiştir ve boyun vermeyi de dikkate almak adına true stress- true strain formülleri kullanılarak gerçek eğriler elde edilmiştir. True stress ve true strain için kullanılan formül aşağıdaki gibidir.

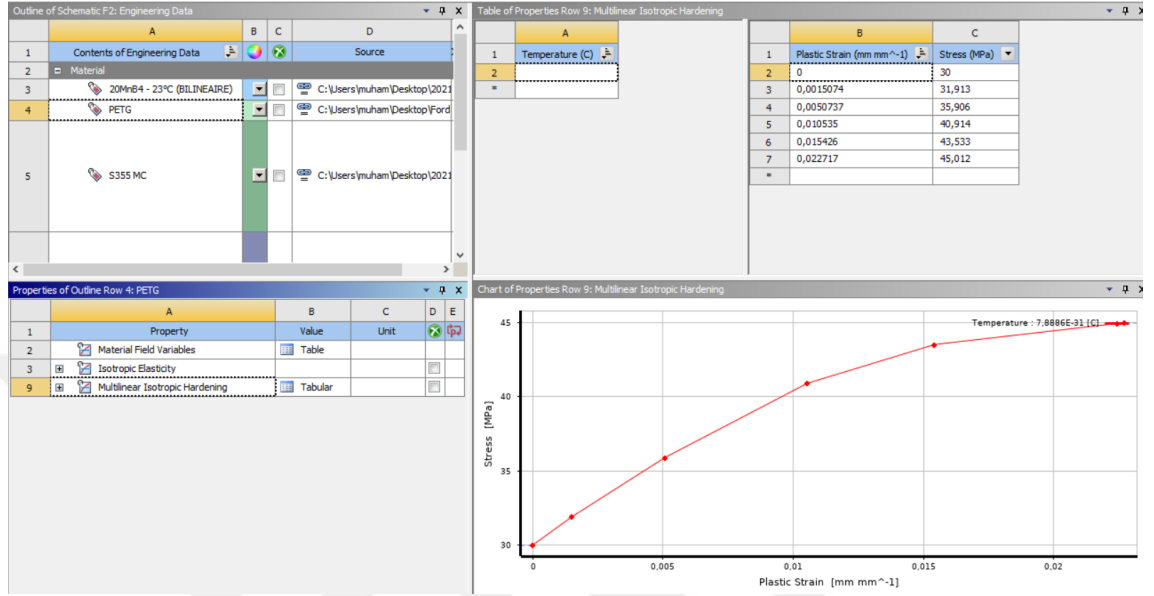
True stress-engineering stress:

$$\sigma_T = \sigma(\epsilon + 1)$$

True strain engineering strain ilişkisi:

$$\epsilon_T = \ln(\epsilon + 1)$$

Şekil 3.28’ de tanımlaması yapılmış PETG’ nin ANSYS arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.27 Ansys malzeme tanımlı bölgesi arayüzü

Simülasyon içerisinde kullanılacak olan diğer malzemeler ise Bölüm 3.6. Sonlu Elemanlar Analizinin Oluşturulması ana başlığı altında açıklanan detay parça malzemelerine riayet edilerek www.steelnumber.com ve hwww.makeitfrom.com internet sitelerinden faydalanılarak Ansys’ e tanımlanmıştır (Anonim 2014)(Anonim 2021p).

3.6.2. Simülasyonun Hazırlanması

Simülasyon çalışması için kullanılacak olan geometri üzerinde mesh sayısını daha küçük tutabilmek ve daha kararlı bir yapıya sahip mesh uygulaması olabilmesi adına kullanılacak olan pedal kutularının geometrilerinde bulunan 2° altındaki açılı yüzeyler ve 0,5mm altındaki radüsler CATIA programı yardımıyla kaldırılmıştır. Ardından .stp(standart for excahnge product) formatında kaydedilen cad datalar Ansys programına spaceclaim modülü yardımıyla aktarılmıştır.

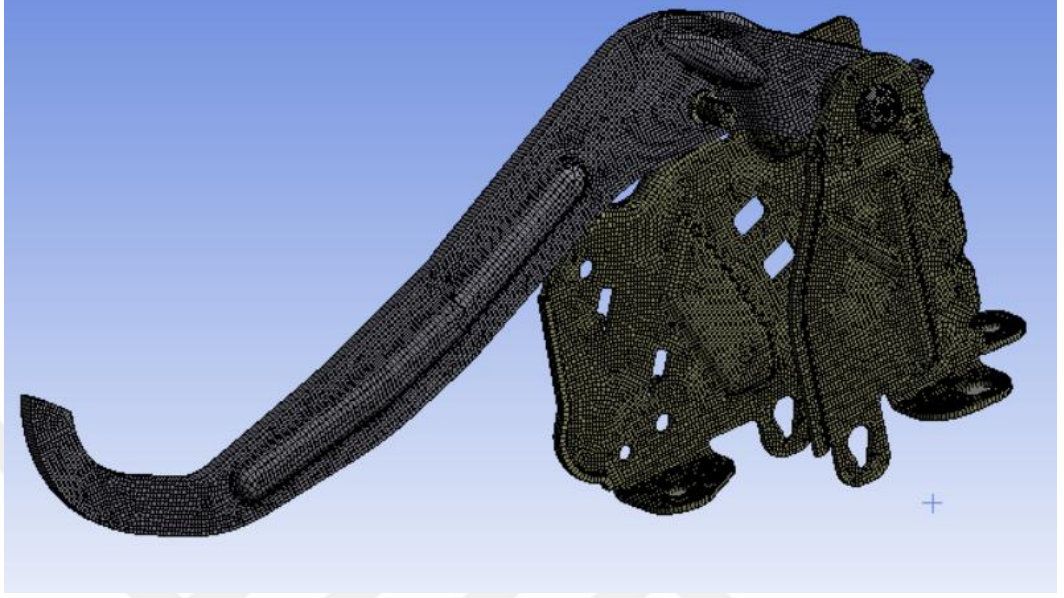
Malzeme bilgilerinin temininin ve geometrinin programa aktarılmasının ardından simülasyonun gerçek test koşullarını temsil edecek şekilde ağ yapısının oluşturulması, kontakların belirlenmesi ve kontak ayarlarının yapılması, kuvvet uygulama noktalarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Simülasyonda kullanılan geometri üç boyutlu bir geometri olmasından dolayı ağ yapısında kullanılan elemanlar da 3 boyutlu elemanlar seçilmek durumundadır. Üç boyutlu elemanlar arasında ANSYS yazılımı hex dominant ve tetra hedron olmak üzere 2 ana eleman seçeneği sunmaktadır. Bu çalışmada farklı denemeler sonucunda hex dominant mesh ağ yapısı ve tetrahedrons ağ yapısı ile yapılan denemeler arasında sonuçları büyük miktarda etkileyebilecek fark tespit edilmemiştir ve bu sebeple hex dominant ağ yapısı mesh sayısını daha az tutabilmek adına tercih edilmiştir.

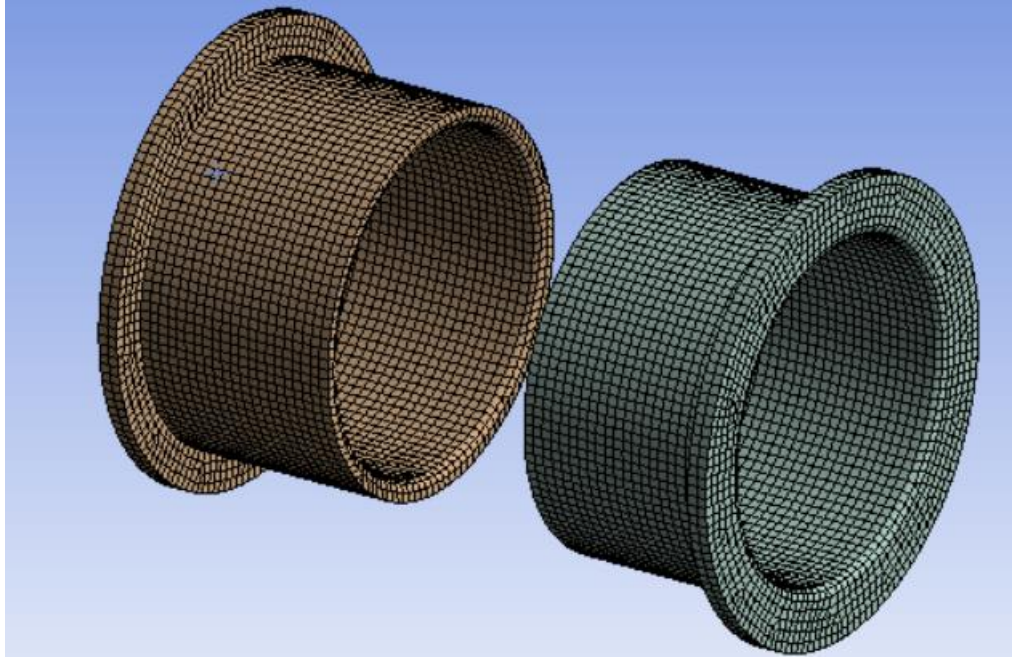
3.6.2.1 Debriyaj Pedalı Simülasyonunun Hazırlanması

Simülasyon ortamına aktarılan geometrinin mesh yapısı simülasyon sonuçlarını oldukça etkileyebilmekte ve bu mesh yapısı belirlenirken mümkün mertebe küçük mesh elemanlarını kullanmak sonuçların doğruluğu açısından statik simülasyonlarda oldukça önemlidir. Ancak kullanılan elemanların boyutu küçüldükçe mesh sayısını arttırmakta ve mesh sayısının fazla olması yakınsama mantığı ile çalışan simülasyon programı için çok daha fazla zaman ihtiyacını ortaya koymaktadır. Bu çalışmada kullanılan hex dominant ağ yapısı için yapılan farklı mesh boyutları için, denemeler sonucunda %5 hata payı ile optimum mesh boyutu olarak burç malzemeleri için 0,5 mm ve kalan

elemanlar için 1,5 mm eleman boyutu tercih edilmiştir. Şekil 3.29-30' da ağ yapısı tamamlanmış pedal ve burçlar görülebilmektedir.

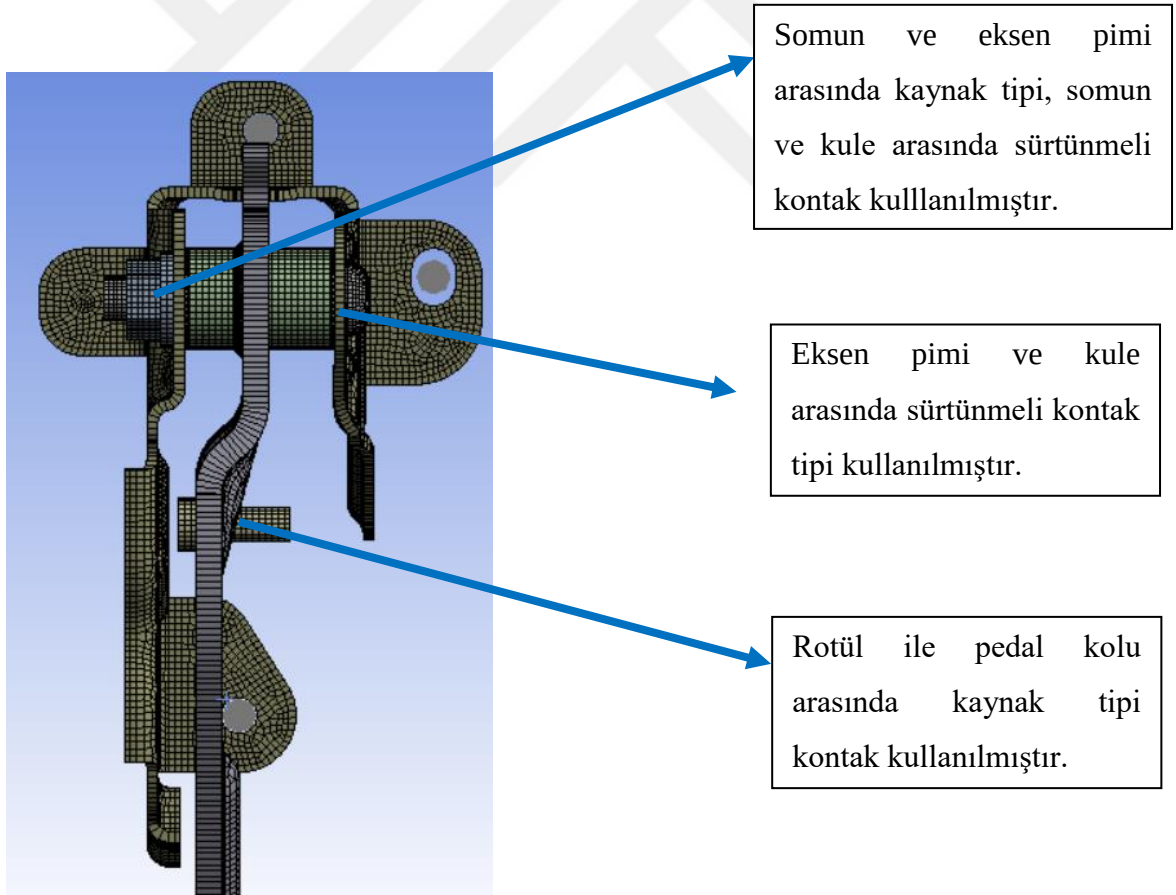


Şekil 3.28 Ağ yapısı tamamlanmış debriyaj pedal kutusu

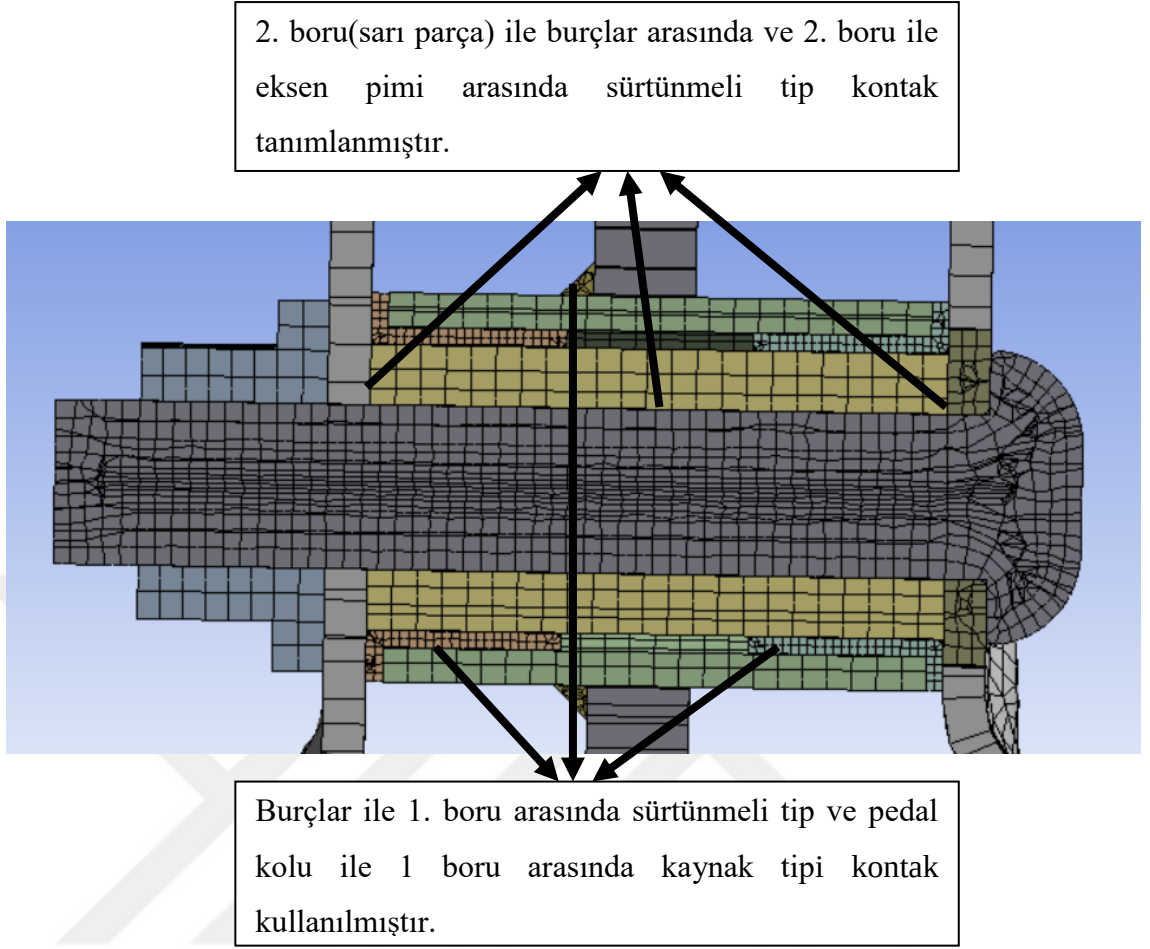


Şekil 3.29 Ağ yapısı tamamlanmış burçlar

Ağ yapısı oluşturulan pedal kutusu için kontak tanımlamaları parçanın fonksiyonu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli parçalar arasında sürtünmeli kontak tipi olan frictional kontak kullanılmıştır. Kaynaklı bölgeler için kaynak(bonded) kontak tipi kullanılmıştır. Kaynak tipi kontak kullanıldığında herhangi bir ekstra bilgiye ihtiyaç duyulmamakla birlikte sürtünmeli tip kontak kullanımında ilave olarak sürtünme katsayısı kullanılması gerekmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda Onur Erol (2019) otomotiv bagaj menteşeleri tasarımı ve optimizasyonu çalışmasında sürtünme katsayısı 0,2 olarak kabul edildiği koşullarda hata payının en düşük olacak şekilde korelasyon elde edildiğini bildirmiştir. Bu minvalde yataklama elemanı olan burç parçasının haricinde kullanılan bütün sürtünmeli kontaklarda 0,2 sürtünme katsayısı dikkate alınmıştır. Bu durumda simülasyonda tanımlanan kontaklar Şekil 3.31' te ve Şekil 3.32' de gösterildiği gibidir.



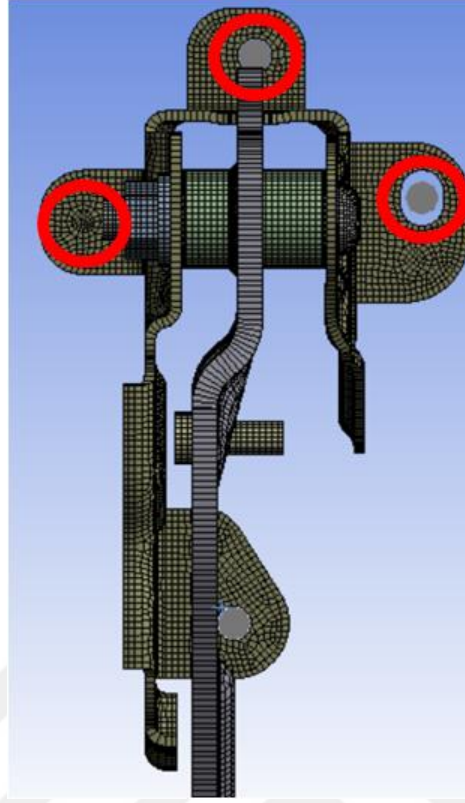
Şekil 3.30 Debriyaj pedal kutusunda tanımlanan kontaklar birinci resim



Şekil 3.31 Debriyaj pedal kutusunda tanımlanan kontaklar ikinci resim

Yalnızca burç elemanları ile 2. boru arasında yağlama durumu söz konusu olduğu için burada kullanılan sürtünmeli tip kontaklar arasında 0,05 sürtünme katsayısı dikkate alınmıştır.

Sınır şartları belirlenirken pedal kutularının laboratuvar ortamındaki testleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bu durumda ortam sıcaklığı 23° belirlenirken, montaj aşamasında kullanılan metirk 8 civataların diş üstü ve kafa çapları dikkate alınarak beam elemanlar ile yapılandırılmıştır. Ayrıca test aparatına yapılan montaj deliklerinden parça sabitlenmiştir. Montaj delikleri Şekil 3.33’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.32 Pedal kutusunun sabitlendiği montaj delikleri

Mesh sayısını mümkün olduğunca az sayıda tutabilmek adına test cihazının tamamı simülasyona ilave edilmemiştir. Bu durumda test aparatının yalnızca debriyaj silindiri ve kuvvet silindirleri simülasyona dahil edilmiştir. Test aparatında kullanılan pistonlar rijit kabul edilmiş, pistonların yaptıkları hareketler dikkate alınarak mafsalları tanımlamaları yapılmış ve bu durumda 4 adet mafsalları kullanılmıştır. Kuvvetin uygulandığı piston ile pedal kolu arasında küresel mafsalları kullanılmıştır. Kuvvet pistonu ile test aparatına bağlandığı nokta arasında evrensel tip mafsalları kullanılmıştır. Debriyaj silindiri ile pedal kolu üzerinde bulunan rotül parçası arasında küresel mafsalları kullanılırken debriyaj silindiri ile test aparatına bağlanan nokta arasında evrensel mafsalları kullanılmıştır. Küresel mafsalları sayesinde herhangi bir öteleme söz konusu olamazken montajlanan noktada bütün eksenlerde parçalar arasında rotasyona müsaade edilmektedir. Evrensel mafsalları ise küresel mafsalları gibi bütün yönlerde öteleme hareketine izin verilmezken yalnızca belirlenen 2 eksen için rotasyon söz konusudur ve 1 eksen için dönme kısıtlanmıştır. Şekil 3.34’ te mafsalları tanımlamaları gösterilmiştir.

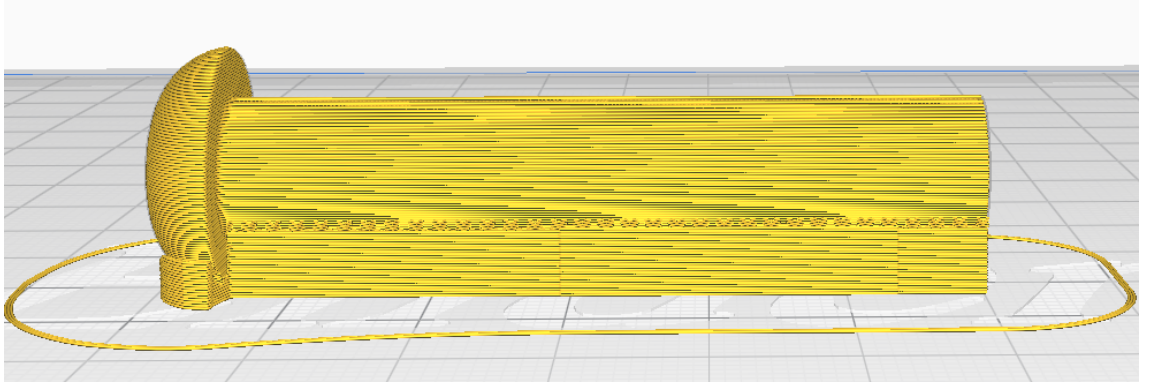


Şekil 3.33 Debriyaj pedalı için yapılan mafsalları tanımlamaları.

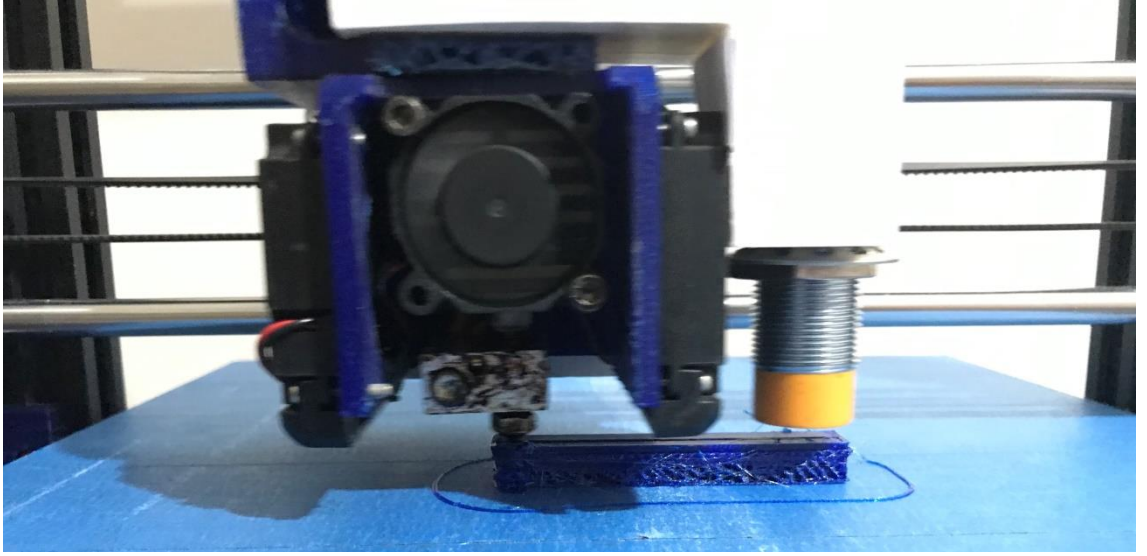
Ortam sıcaklığı, kontak tipleri ve sınır şartları belirlenen pedal kutusuna 800N' luk bir kuvvet uygulaması yapılmıştır. 800N kuvvet değeri literatür tarasaması neticesinde Kale (2016) tarafından yapılan ağırlığı azaltılmış fren pedalı tasarımı ve test düzeneği geliştirilmesi çalışmasından alınan bir kuvvet değeriyle aynı değeri olmakla birlikte bu değeri belirlenirken bir insanın fren pedalına uygulayabileceği maksimum değeri olan 400N' un 2 emniyet katsayısı dikkate alınarak elde edilmiştir (Kale, 2016).

3.7 PETG Eksen Pimi Testi

Pedal pimi üretimi gerçekleştirilirken taguchi yöntemi ile belirlenen optimum parametreler dikkate alınarak 0,2 mm katman yüksekliği, 0,2 mm çizgi kalınlığı, 235°C nozzle sıcaklığı, soğutucu fan kapalı, 25mm/s yazma hızı %20 örtüşme oranı ve pim eksenine paralel olarak üretim yapılmıştır. Pim eksenine paralel üretim yapabilmek adına üretim aşamasında destek(support) komutu kullanılmıştır. Üretim aşamasında kullanılan geometride parça üzerinde süreksizliğe yol açmaması adına somun montajının gerçekleştirildiği dişler bulunmamaktadır. Üretimi biten eksen pimi üzerine daha sonra metrik 8 diş adımına sahip bir parfta yardımıyla diş açılmış ve montaja hazır getirilmiş ve ardından montajı yapılmıştır. Şekil 3.35' te CURA programındaki üretim öncesi görsel, Şekil 3.36' de FDM yazıcıdaki imalatı ve Şekil 3.37' de imalatı tamamlanmış eksen pimi ve Şekil 3.38' de yeni eksen pimi montajlanmış debriyaj pedal kutusu görülmektedir.



Şekil 3.34 Eksen piminin CURA ile katmanlanması



Şekil 3.35 Eksen piminin FDM yazıcı ile üretilmesi

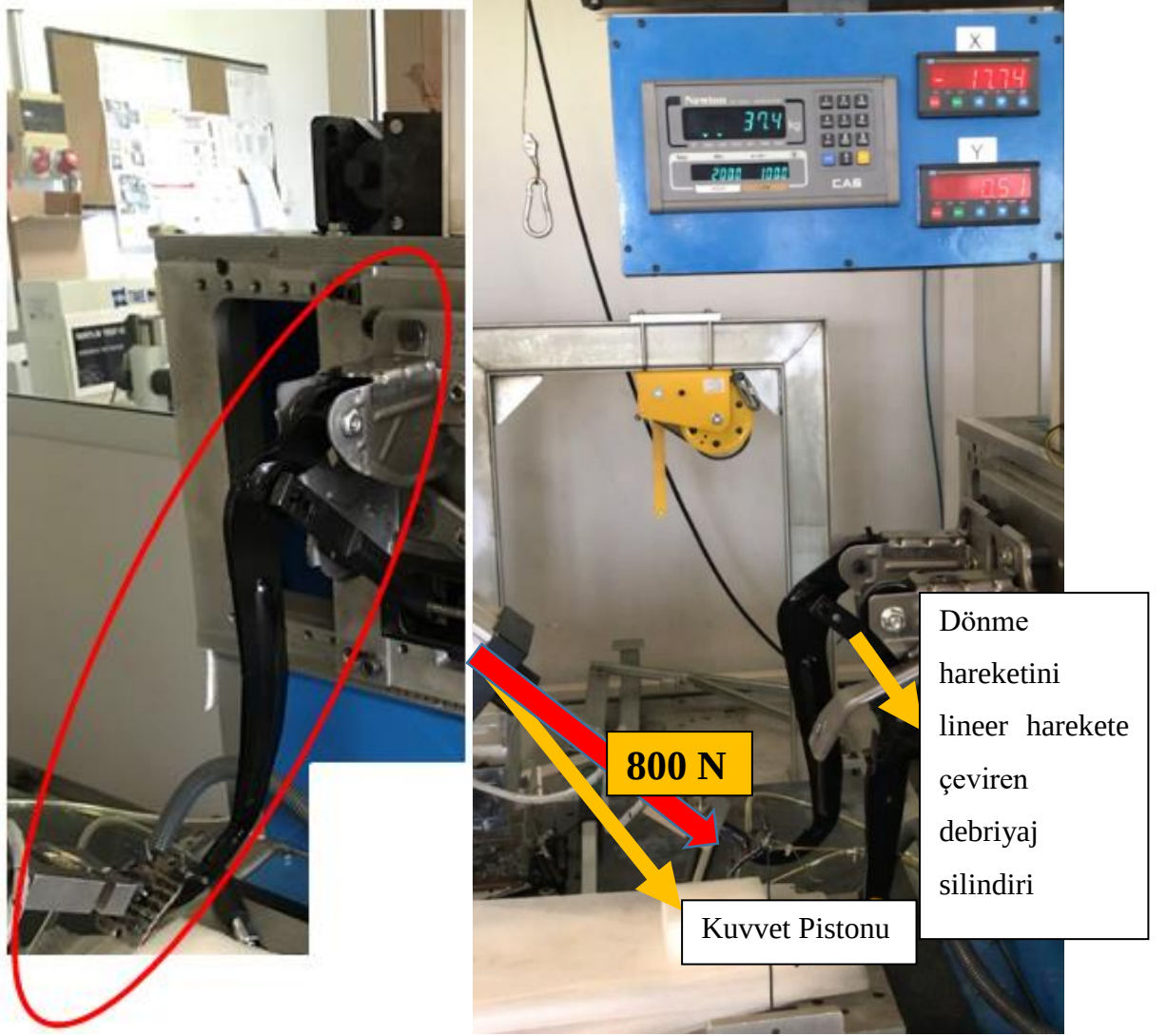


Şekil 3.36 İmalatı tamamlanmış eksen pimi



Şekil 3.37 PETG Eksen pimi ile üretilmiş debriyaj pedal kutusu

Montajı tamamlanmış debriyaj pedal kutusu montaj deliklerinden metrik 8 civata ve somun kullanılarak test aparatına montajlanmıştır. Test aparatına montajlanan pedal kutusuna debriyaj silindiri pedal kolu üzerindeki rotüle evrensel mafsalları görevini yerine getirebilecek şekilde ve kuvvet pistonu pedal ayak basma sacı üzerine montajlanmıştır. Test aparatı üzerine bulunan ekran vasıtasıyla yüklemeye sırasında kaç newton yük uygulandığı görülebilmektedir. Test aparatına montajı yapılmış debriyaj pedal kutusu Şekil 3.39’ te görülebilmektedir.



Şekil 3.38 Test aparatına montajı yapılmış debriyaj pedal kutusu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Çekme Testi

Taguchi metodu ile belirlenen parametre ve seviyeleri dikkate alınarak hazırlanan numuneler çekme test cihazına bağlanmış ve çekme kuvvetine maruz bırakılan parçaların test sonuçları minitab programında daha önceden L8 matrisi ile hazırlanmış deney düzeneği sıralamasına uygun olarak satırlara girilmiştir. Çizelge 4.1’ de sonuçlarında girildiği L8 matrisi görülmektedir.

Çizelge 4.1 Test sonuçlarının da ilave edildiği Taguchi L8 matrisi

No	Nozzle Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Soğutucu Fan Hızı	Yazma Hızı	Çizgi Kalınlığı	Örgü Yönü	Örgü Örtüşme Oranı	Test 1	Test 2	Test 3
1	235°	0,08	0	25	0,2	Dik	20	41.8	42.5	43.8
2	235°	0,08	0	100	0,4	Paralel	100	19.7	21.6	23
3	235°	0,2	100	25	0,2	Paralel	100	32.5	35.7	29
4	235°	0,2	100	100	0,4	Dik	20	42.2	41.2	41.5
5	260°	0,08	100	25	0,4	Dik	100	36.1	30.5	35.2
6	260°	0,08	100	100	0,2	Paralel	20	25.5	20.6	23.2
7	260°	0,2	0	25	0,4	Paralel	20	37.1	38.9	39
8	260°	0,2	0	100	0,2	Dik	100	39.5	42	40

Elde edilen sonuçlarla ve minitab programı yardımı ile Taguchi analizi yapılmıştır. Taguchi analizi yapılırken çalışmanın odak noktası olan maksimum çekme kuvvetini bulabilmek adına minitab programında ‘larger is better’ yani büyük olan ideal seçeneği seçilerek analiz edilmiştir. Analiz öncesi sonuçlar yorumlandığında en yüksek çekme değerleri 1. ve 4. satırlarda gerçekleşmiştir. Satırlar incelendiğinde 235°C nozzle sıcaklığı, %20 örgü örtüşme oranı ve örgü yönleri parametrelerinin aynı seviyelerde olduğu ve kalan parametrelerin farklı seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu ortak parametreler maksimum çekme kuvveti için etkili parametreler arasında sayılabilir ancak Taguchi analizi sayesinde ortak olmayan parametreler de dahil olmak üzere bütün

parametrelerle maksimum çekme kuvveti için gerekli optimum değerler tespit edilebilecektir. Taguchi analizi yardımı ile aynı zamanda gürültü faktörü ölçümü de yapılmıştır. Gürültü faktörü taguchi deney tasarımlarında, gürültü faktörü olarak adlandırılan yani kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini en aza indirerek bir ürün veya süreçteki değişkenliği azaltan kontrol faktörlerini tanımlamak için kullanılan bir sağlamlık ölçüsüdür. Sinyal-gürültü oranının (S / N) daha yüksek değerleri, gürültü faktörlerinin etkilerini en aza indiren kontrol faktörü ayarlarını tanımlamaktadır. Şekil 4.1’ de taguchi analizi sonucu maksimum çekme değerini veren parametre seviyeleri ve Şekil 4.3’ de gürültü faktörü tablosu gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Taguchi analizi sonucu maksimum çekme değerlerini veren parametreler

Şekil 4.1’ e göre sonuçlar yorumlandığında ortalama olarak 34.5 MPa çekme değeri için parametreler seviyelerine göre artıp azalmıştır. Bu durumda tablo değerlendirildiğinde ise çekme kuvvetine en çok etki eden parametrenin, örgü yönü olduğu ve çekme yönüne paralel olacak şekilde tabloda dikey olarak basılan numunenin daha fazla çekme kuvveti sağlayacağı tespit edilmiştir. Yani çekme yönüne dik olarak basılan bir numune için beklenen tahmini çekme değeri 30 Mpa altında bir değer

olabilecek iken paralel yönde basılan bir numunenin çekme değerleri tahmini olarak 40Mpa civarında olabilecek ve yaklaşık olarak %30 luk bir değer farkı olacağı tespit edilmiştir. Dolzyk ve Jung (2019) PETG malzemesi ile FDM printer ile yaptıkları çalışma da çekme yönüne paralel olarak yapılan üretimin en yüksek çekme değerini verdiğini ortaya koymuştur.

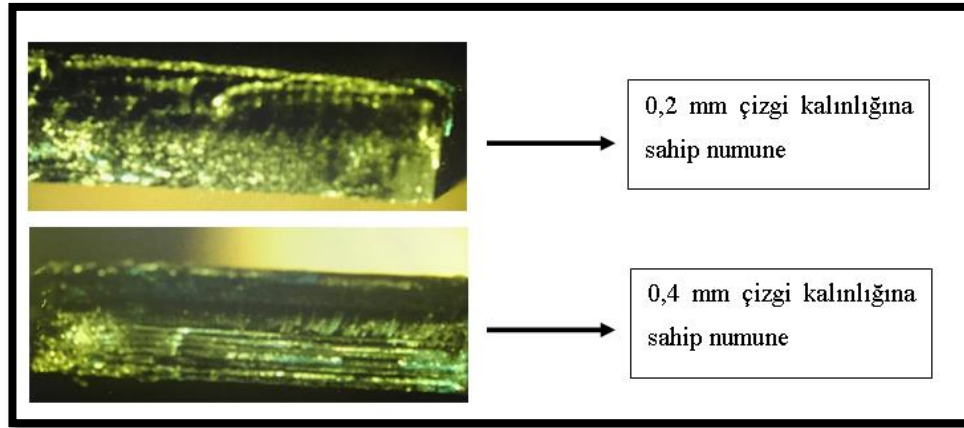
Şekil 4.1' e göre çekme dayanımını en çok etkileyebilecek ikinci parametre ise katman yüksekliğidir. Katman yüksekliği arttıkça çekme dayanımı artmaktadır. Katman kalınlığı 0,08 mm iken 30Mpa civarında olacağı tahmin edilen numunenin katman yüksekliğinin 0,2 mm olduğunda ise 38 MPa seviyelerinde olabilmesi ve yaklaşık olarak %21' lik bir fark ortaya koyabileceği bulunmuştur. Panneerselvam ve diğerleri (2020) PETG malzemesinin FDM tipi yazıcı ile üretimini incelyen ve üretim parametrelerinin optimizasyonunu inceleyen çalışmasında da katman yüksekliğinin çekme kuvvetine doğru orantılı olduğu tespit etmişlerdir.

Üçüncü etkili parametre ise yazma hızı olarak tespit edilmiştir. Yazma hızının 25mm/s iken tahmini çekme dayanımı 37 MPa olabilmesi beklenirken 100mm/s iken 31 MPa olması beklenmekte ve yaklaşık olarak % 16' lık bir fark ortaya koyabileceği tespit edilmiştir. Sanatgar ve diğerleri (2017), PLA malzemesi ile yaptıkları çalışmada yazdırma hızının adhezyon değerlerini etkileyebileceğini ve dolayısı ile katmalar arası yapışma kuvvetlerinin etkilenebileceğini ve bu sebeple dayanımın etkilenebileceğini tespit etmiş ve yüksek hızlarda daha düşük dayanım elde edilebileceği üzerine çalışma yapmışlardır. Yine Agarwala ve diğerleri (1996), yazma hızının yüzey kalitesini etkilediğini ve düşük yüzey kalitesine sahip olan numuneler üzerinde süreksizliklerden kaynaklanarak mekanik özelliklerde dayanımın olumsuz etkilendiği tespit edilmiş ve düzgün yüzeyler elde edebilmek için düşük yazma hızlarının kullanılmasının gerektiği tespit edilmiştir.

Dördüncü etkili parametre numunelerin dış kontörünün tamamlanmasının ardından doldurulan iç bölgenin kenar çizgileri üzerindeki oranını belirleyen örgü örtüşme oranı olduğu tespit edilmiştir. Örgü örtüşme oranı arttıkça çekme kuvvet değerinin 36Mpa' dan 32 MPa' a düştüğü tespit edilmiştir.

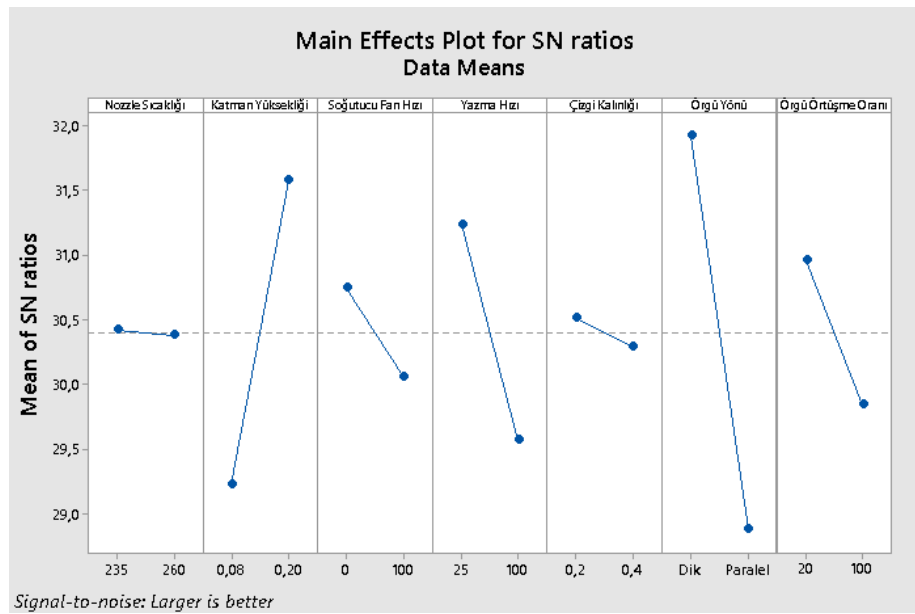
Beşinci etkili parametre soğutucu fan hızı olarak tespit edilmiştir. Soğutucu fan çalıştırıldığında 33 MPa olabileceği tahmin edilen çekme dayanımı soğutucu fan kapatıldığında ise 35,5MPa olabileceği tespit edilmiştir. Soğutucu fan ile nozzle' dan akan malzemenin sıcaklığının zorlanarak soğutulması gerçekleştirilmektedir. Bu durumda normalden daha hızlı bir soğuma gerçekleşmekte olup katmanlar arası bağ kurarak birleşme işlemi için süre limiti azalacaktır. Bu durumda daha düzgün geometrik şekiller elde edilmesine karşın daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Lee ve Liu (2019) PLA malzemesi ile FDM yazıcıdan aldıkları numuneler üzerine yaptıkları çalışmada yüksek fan hızlarının katmanlar arası hava keseciklerinin oluşturduğunu ve boşlukların fan hızına paralel olarak arttığını tespit etmişler, bu durumun da mekanik dayanıma olumsuz yönde etki ettiğini bildirmişlerdir.

Altıncı etkili parametre çizgi kalınlığı olarak tespit edilmiş ve 0,2 mm çizgi kalınlığına sahip olan numunenin 0,4 mm çizgi kalınlığına sahip olan numuneden daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Numuneler incelendiğinde 0,2 mm çizgi kalınlığına sahip olan parçaların çok daha pürüzsüz yüzeylere sahip olduğu gözle görülmüştür. Turner ve Gold (2015), PLA ile yaptıkları çalışmada katman yüksekliklerinin belirli bir seviyenin üzerine çıktığında mekanik dayanımı olumsuz yönde etki ettiğini ve buna sebep olarak çok yüksek katman kalınlıklarına çıktığında yapı içerisinde hava keseciklerinin sayısının katman yüksekliği ile doğru orantılı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Düşük çizgi kalınlığı verilen numuneler gözle incelendiğinde ise iç kesitlerinin 0,4 mm çizgi kalınlığına sahip olan parçalara oranla çok daha boşluksuz ve düzgün bir yapıya sahip oldukları belirlenmiştir ve Turner ve Gold' un yaptığı çalışmayı destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.2' de 0,2 mm ve 0,4 mm kalınlığına sahip 2 numunenin 20X yakınlaştırılmış haliyle görseli görülebilmektedir.



Şekil 4.2 0,2mm ve 0,4 mm çizgi kalınlıklarına sahip numunelerin 20X yakınlaştırılmış kesit görüntüleri

Yedinci ve son etkili parametre ise nozzle sıcaklığıdır. PETG malzemesi için belirlenen 235°-260° arasında mekanik dayanım değerleri arasında büyük bir fark oluşmamıştır. Bu durum malzemenin katmanlar arası bağ kurabilmek için yeterli koşulları mevcut sıcaklık aralığı ile elde ettiğini göstermektedir.



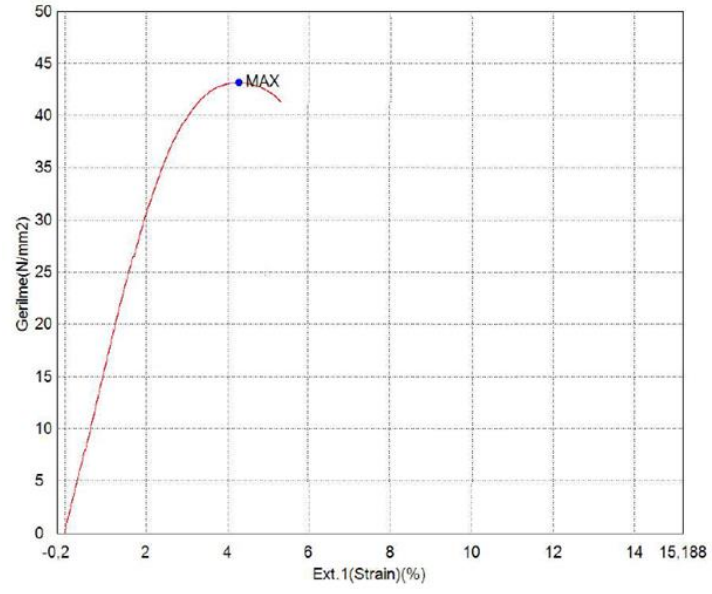
Şekil 4.3 Taguchi analizi sonucunda elde edilen gürültü faktörü parametreleri

Şekil 4.3 incelendiğinde çekme değerlerini etkileyebilecek olan ve süreçteki değişkenliği en aza indirebilecek olan parametreler de mekanik dayanımı en yüksek seviyede tutabilmek için seçilmesi gereken parametreler ile aynı sıralamaya sahip olduğu ancak etki oranlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Bu durumda mekanik dayanımı etkileyen ve kontrol edilemeyen faktörlerin önüne geçerek varyansı azaltabilecek olan parametreler arası sıralama en etkiliden en etkisize olacak şekilde örgü yönü, katman yüksekliği, yazma hızı, örgü örtüşme oranı, soğutucu fan hızı, çizgi kalınlığı ve nozzle sıcaklığıdır. En yüksek çekme dayanımını elde edebilmek ve varyansı minimumda tutabilmek adına taguchi çalışması sonucunda üretimde kullanılması gereken numune parametreleri çekme yönüne paralel yönde örgü yönü, 0,2 mm katman yüksekliği, 25 mm/s yazma hızı, %20 örgü örtüşme oranı, kapalı soğutucu fan hızı, 0,2 mm çizgi kalınlığı ve 235° nozzle sıcaklığı ile numuneler üretilmiş ve bu numuneler de teste tabi tutulmuştur. Testler sonucunda ortalama maksimum çekme dayanımı 43,3 MPa olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.4’ te bulunan optimum parametreler kullanılarak üretilen numuneler görülmektedir. Şekil 4.5’ de teste tabi tutulan 3 numunenin ortalama grafiği ve Şekil 4.6’ da çekme testi sonrası kırılan numunelerin görselleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Optimum parametre ve seviyeleri kullanılarak üretilmiş olan numuneler.



Şekil 4.5 Optimum parametreler ile üretilmiş olan numunelerin ortalama çekme testi grafiği



Şekil 4.6 Optimum parametre ve seviyeleri kullanılarak üretilen numunelerin çekme testi sonrası durumu

4.2. PETG Eksen Pimi Test Sonuçları

Etkili parametreler kullanılarak FDM yazıcıda üretilen eksen pimi debriyaj pedal kutusuna montajlandıktan sonra test aparatına bağlanmış ve 800N yüke maruz bırakılmıştır. Yapılan test sonucunda pimin 800N yüke dayandığı ve test sonucunda gözle görülür herhangi bir çatlak veya kalıcı deformasyon tespit edilmediği ancak yüklemenin 800N' da kesilmeden devam ederek 835N yük altına geldiğinde ise kırıldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7' de 800N yük altındaki debriyaj pedal kutusu, Şekil 4.8' de 800N yüke maruz bırakılmış ve çekilmiş olan eksen pimi ve Şekil 4.9' da 835N yük altında kırılmış olan eksen pimi görselleri görülmektedir.

Şekil 4.9 incelendiğinde ise pedal piminin debriyaj kulesine montajlandığı bölgedeki her iki deliğin değiştiği bölgeden kesme kuvvetine maruz kaldığı ve yalnızca deliklere değiştiği bölgelerden kırıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 800N yük altındaki debriyaj pedal kutusu



Şekil 4.8 800N yüke maruz kaldıktan sonra eksen pimi

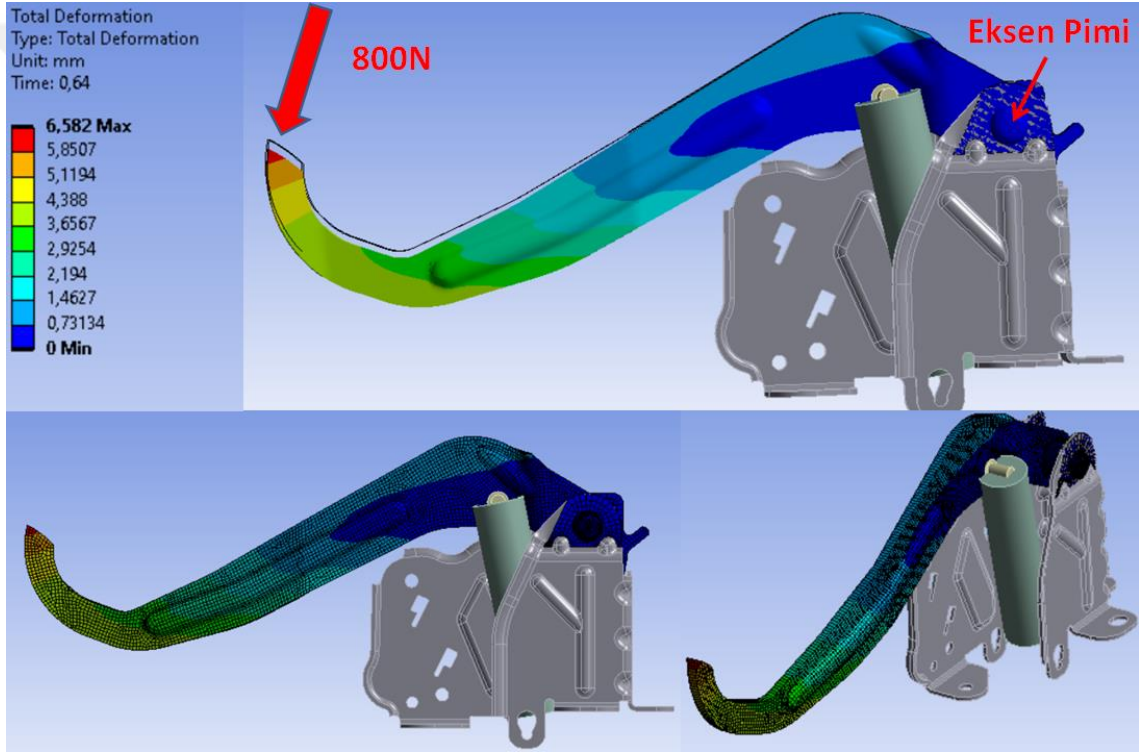


Şekil 4.9 835N yük altında kırılan eksen pimi

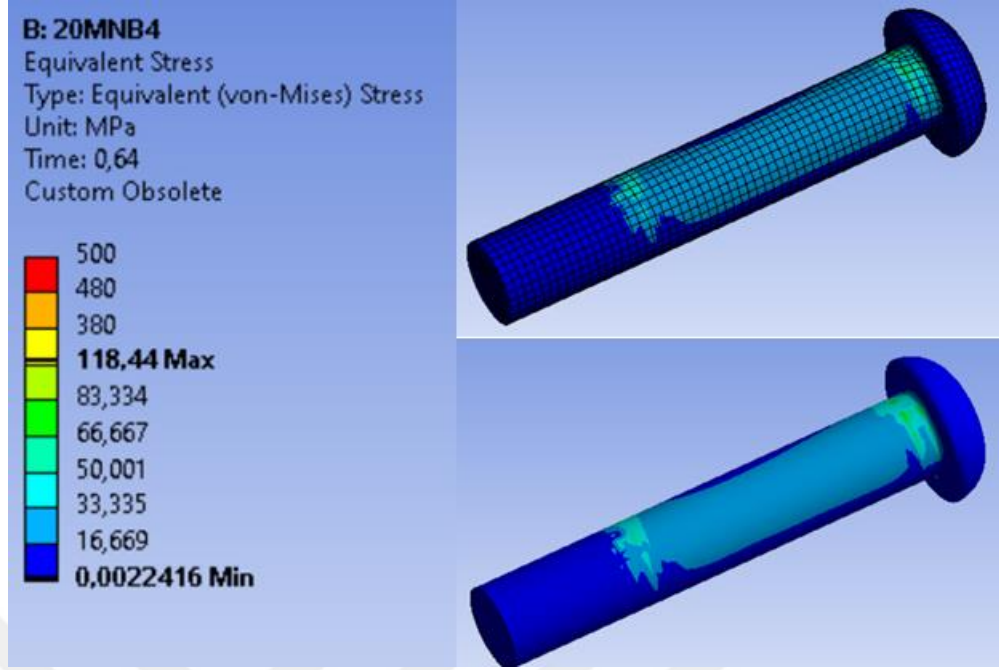
4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Debriyaj pedal kutusu simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi 2 aşamalı yapılmıştır. Karşılaştırmaya dayalı olan bu değerlendirme şekli için öncelikle mevcut durumdaki metal malzemeye sahip eksen pimli pedal kutusunun simülasyonu yapılmış ve ardından PETG malzemeli eksen pimi simülasyonu yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Mevcut haliyle 20MnB4 malzemesi kullanılarak üretilmiş eksen pimi kullanılan debriyaj pedal kutusu için 800N yük altındaki simülasyon sonuçları Şekil 4.8’ te deformasyon değerleri ve Şekil 4.9’ da 800N yük altında stress değerleri gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde maksimum deformasyon miktarı debriyaj pedal kolunun uç noktasında 6,582 mm olarak ölçülmüştür. Stress değerleri incelendiğinde ise 20MnB4 malzemesinin akma değeri olan 380 MPa’ dan çok daha düşük seviyelerde olarak 118 MPa olduğu görülmektedir. Bu durumda akma değerinin altında kalan eksen pimi için herhangi bir plastik deformasyonun oluşmadığı ve pimin 800N altında güvenli bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

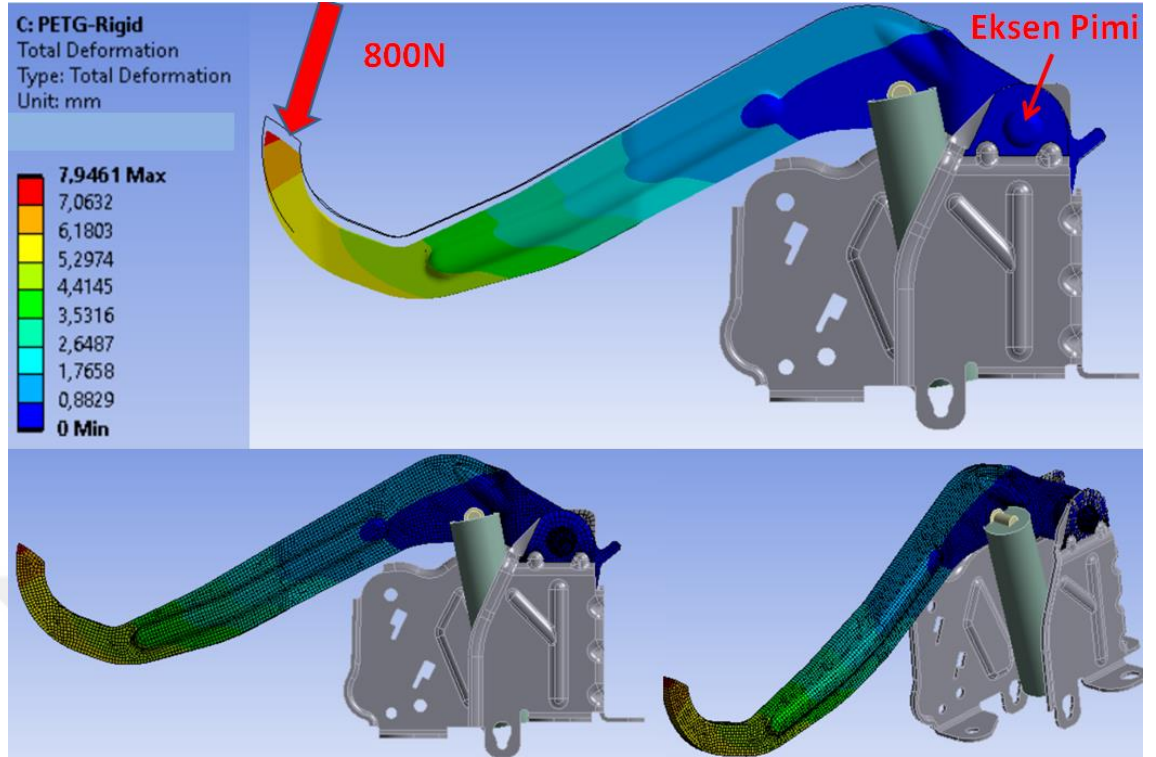


Şekil 4.10 Metal malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu deformasyon sonuçları

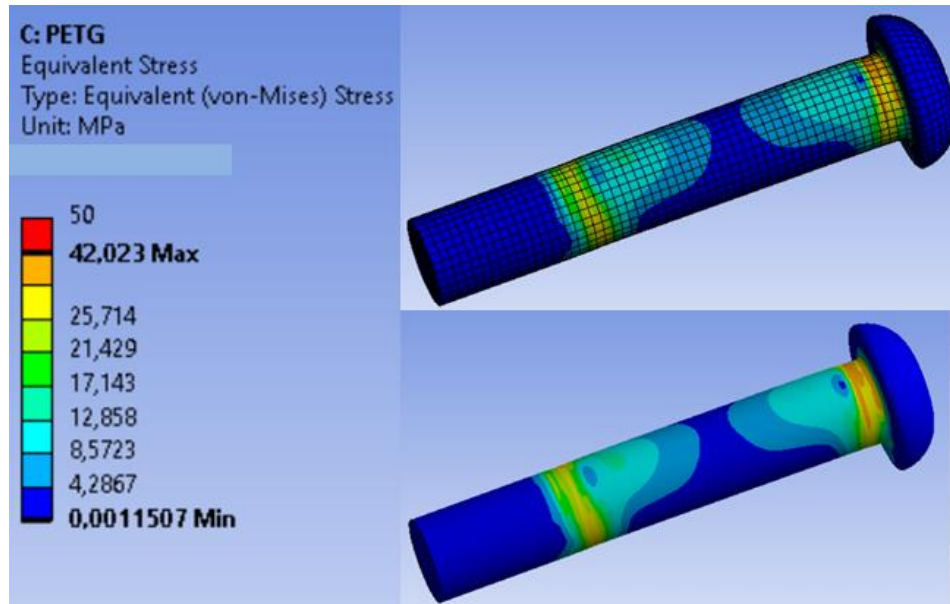


Şekil 4.11 Metal malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi stress değerleri sonuçları

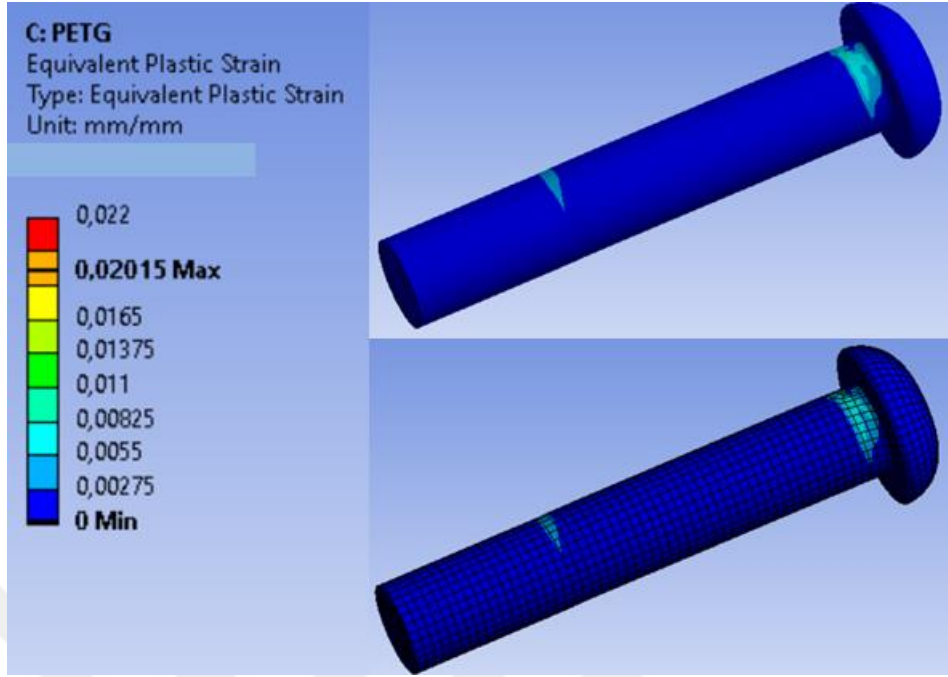
FDM yazıcı ile PETG malzemesi kullanılarak üretilmiş eksen pimi kullanılan debriyaj pedal kutusu için 800N yük altındaki simülasyon sonuçları Şekil 4.10’ da deformasyon değerleri ve Şekil 4.11’ de 800N yük altında stress değerleri gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde maksimum deformasyon miktarı debriyaj pedal kolunun uç noktasında 7,95 mm olarak ölçülmüştür. Stress değerleri incelendiğinde ise PETG malzemesinin akma değeri olan 30 MPa değerinin oldukça üzerinde olan ve kopma değeri olan 45MPa ‘a çok yakın 42 MPa değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Eksen pimi ile alakalı olarak kırılma yorumu yapabilmek için eksen piminin plastik uzama değerleri değerlendirilmiş olup Şekil 4.12’ de plastik uzama değerleri görülmektedir.



Şekil 4.12 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu deformasyon sonuçları



Şekil 4.13 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi stress değerleri sonuçları



Şekil 4.14 PETG malzemeli eksen pimi kullanılan debriyaj pedalı simülasyonu eksen pimi plastik uzama değerleri sonuçları

800N yük altında plastik uzama değerleri değerlendirildiğinde ise plastik uzama kriteri olan 0,022 mm/mm değerinin daha aşağısında olan 0,2015 mm/mm plastik uzama değeri tespit edilmiştir. Bu durumda PETG malzemesi kullanılarak FDM printer ile üretilen eksen piminin güvenli bölgede kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Sonuçlar karşılaştırıldığında 20MnB4 malzemesi ile üretilen pedal piminin çok daha güvenli olduğu ancak 800N sınır şartı göz önünde bulundurulduğunda PETG malzemesi 20MnB4 ‘ün alternatifi olarak kullanılabileceği simülasyonlarca da tespit edilmiştir.

Netice olarak;

Çekme dayanımını en çok etkileyen parametre ve yüzdeleri şu şekilde tespit edilmiştir;

- Örgü yönü % 30
- Katman yüksekliği % 21
- Yazma hızı % 16
- Örgü örtüşme oranı % 14
- Soğutucu fan % 8,4
- Çizgi kalınlığı % 3,2
- Nozzle sıcaklığı % 2,5

Metal malzemeli üretim ile 33 gram olan eksen pimi eriyik yığma modelleme tipi üreticiden PETG malzemesi ile belirlenen parametre ve seviyelerde üretildiğinde ise ağırlığı 6 gramdır. Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 metal ve PETG malzemeli pimlerin ağırlıklarını ve yan yana olan görsellerini göstermektedir.



Şekil 4.15 PETG malzemeli eksen piminin hassas terazi ile ölçümü



Şekil 4.16 Metal malzemeli eksen piminin hassas terazi ile ölçümü



- **Şekil 4.17** Metal ve PETG malzemeli pimlerin yan yana görseli

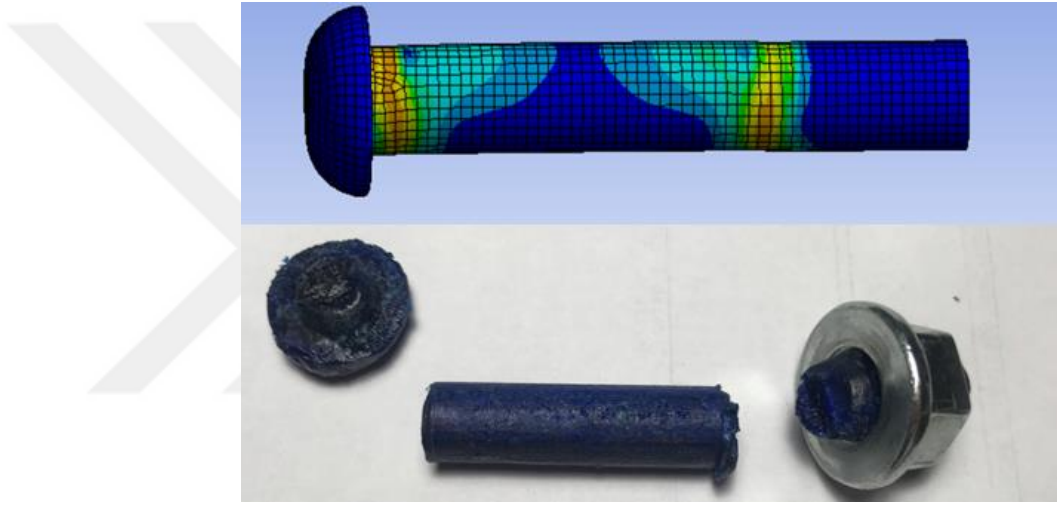
5. SONUÇ

Bu çalışmada polietilen tereftalat glikol malzemesinin eritik yığma modelleme tipi yazıcı kullanılarak üretilen parçaların mekanik dayanımı üzerine incelemelerde bulunulmuştur. Eriyik yığma modelleme tipi yazıcılarda üretilen ürünlerin mekanik davranışlarındaki farklılıkların üretim sürecinden etkilendiği tespit edilmiş ve maksimum çekme dayanımının elde edilebileceği üretim parametreleri üzerine odaklanılmıştır. Bu durumda belirlenen üretim parametrelerinin etkileri Taguchi deney tasarımı metodu ile incelenmiş ve optimum parametreler ve seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi deney tasarımı oluşturulurken yedi farklı parametre 2 seviyeli olacak şekilde nozzle sıcaklığı(235°-260°), katman yüksekliği(0,08mm-0,2mm), soğutucu fan hızı(%0-%100), yazdırma hızı(25mm/s-100mm/s), çizgi kalınlığı(0,2mm-0,4mm), örgü yönü(çekme yönüne dik-çekme yönüne paralel) ve örgü örtüşme oranı(%20-%100)) belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında örnek bir çalışma otomotiv pedal kutusunda kullanılan eksen pimi ile ortaya konulmuş olup, çalışma simülasyonlar ve gerçek testler ile doğrulanmıştır. Belirlenen kriterlere uygun şekilde beklenen fonksiyonu yerine getiren PETG eksen pimi aynı zamanda mevcutta kullanılan metal malzemeli eksen pimine oranla çok daha hafiftir.

Elde edilen sonuçlar:

1. Maksimum çekme dayanımının elde edilebileceği parametre ve seviyeleri şu şekilde tespit edilmiştir;
 - 235°C nozzle sıcaklığı
 - 0,2 mm katman yüksekliği
 - Kapalı soğutucu fan
 - 25 mm/s yazma hızı
 - 0,2 mm çizgi kalınlığı
 - Çekme yönüne paralel örgü yönü
 - %20 örgü örtüşme oranı

2. Belirlenen optimum parametreler ile üretilen numuneler ile yapılan çekme testi sonucunda ortalama maksimum çekme dayanımının 43,3 MPa olarak tespit edilmiştir.
3. Örnek çalışma olarak debriyaj pedal kutusunda kullanılan eksen piminin güvenliği, simülasyon sonuçları ve gerçek testler ile doğrulanmıştır. Testlerde 800N kuvvetinin üzerine çıkılarak 835N kuvvet altında kırılan pim ile simülasyondaki stress bölgeleri arasındaki tutarlılık tespit edilmiştir. Şekil 5.3 835N’ da kırılan eksen pimi ile simülasyondaki stress bölgelerini göstermektedir.



Şekil 5.1 835N yük altında kırılan eksen pimi ile eksen pimi simülasyonundaki stress bölgeleri karşılatırmalı görseli

4. Simülasyon sonuçlarına göre 800N altında %17 deformasyon farkına sahip olarak debriyaj pedal kutusu eksen pimi PETG materyali kullanılarak herhangi bir risk oluşturmadan eriyik yığma modelleme tipi üç boyutlu yazıcıdan belirlenen parametreler ile üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Agarwala, M.K., Jamalabad, V.R., Langrana, N.A., Safari, A., Whalen, P.J. ve Danforth, S.C. 1996.** Structural quality of parts processed by fused deposition. Rapid Prototyping Journal, 2(4), pp. 4-19. <https://doi.org/10.1108/13552549610732034>.
- Anonim 2014.** S420MC. http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=207(Erişim Tarihi: 15.05.2021).
- Anonim 2016a.** FEA Analysis and Predicting the Performance of 3D Printing. <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13614/FEA-Analysis-and-Predicting-the-Performance-of-3D-Printing.aspx>.(Erişimtarihi:09.03.2017).
- Anonim 2016b.** Finite Element Analysis for FDM 3D printing. <http://my3dmatter.com/fea-for-fdm-3d-printing/> (Erişim Tarihi 12.07.2017).
- Anonim 2018.** 3D Printer Teknolojileri Nelerdir, Nasıl Çalışır. <https://www.kaizen40.com/3d-printer-teknolojileri-nelerdir/> (Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2019a.** The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!> (Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2019b.** PETG. <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>(Erişim Tarihi:15.05.2021).
- Anonim 2021a.** Stereolithography(SL). <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography> (Erişim Tarihi:18.01.2021).
- Anonim 2021b.** Introduction to SLS 3D printing. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/> (Erişim Tarihi 14.04.2021).
- Anonim 2021c.** Introduction to material jetting 3D printing. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/> (Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2021d.** Introduction To Material Jetting 3D Printing. <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/> (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021e.** Introduction to FDM 3D printing. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/> (Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2021f.** <https://tr.pinterest.com/pin/507851295475795890/> (Erişim Tarihi 01.09.2021)
- Anonim 2021g.** İlk Katman Kalibrasyonu. <https://store.metatechtr.com/ilk-katman-kalibrasyonu-first-layer-calibration> (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021h.** PETG filament nedir nasıl baskı alınır. <https://filamentbizde.com/petg-filament-nedir-nasil-baski-alinir/> (Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2021i.** PETG Blue. <https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/petg-blue-translucent-filament-1.75mm> (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021j.** TwoTrees Bluer 3D Printner. <https://twotrees3d.com/fdm-printer/#> (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021k.** Z Axis Issues. <http://community.robo3d.com/index.php?threads/inconsistencies-in-z-axis-z-lift-issues-during-retractions-in-print.6295/> (Erişim Tarihi 01.09.2021)

- Anonim 2021m.** Wheel Deformation Problem. https://www.reddit.com/r/CR10/comments/8e5bub/is_this_normal_for_the_wheels_or_are_they_too/ (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021n.** Plastic Bush. <https://www.thingiverse.com/thing:2202854> (Erişim Tarihi:01.09.2021)
- Anonim 2021o.** Uzaras 1.75mm navy petg filament 1000gr. <https://www.uzaras3d.com/filament-1230295310/pet-g-424726406/uzaras-1-75mm-navy-petg-filament.html>(Erişim Tarihi 15.05.2021).
- Anonim 2021p.** 20MnB4. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.5525-20MnB4-Boron-Steel> (ErişimTarihi:01.09.2021).
- Dolzyk, G., ve Jung, S. 2019.** Tensile and fatigue analysis of 3d-printed polyethylene terephthalate glycol. Journal of Failure Analysis and Prevention, 19(2), 511-518.
- Drummer, D., Cifuentes-Cuéllar, S. ve Rietzel, D. 2012.** Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling. Rapid Prototyping Journal, 18(6), s. 500-507. <https://doi.org/10.1108/13552541211272045>.
- Erol O. 2019.** Binek araçlarda bagaj menteşesi tasarımı ve optimizasyonu (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim kurulu başkanlığı tez merkezi veri tabanından erişildi. (Tez Numarası: 547965).
- Eshkalak, S. K., Ghomi, E. R., Dai, Y., Choudhury, D. ve Ramakrishna, S. 2020.** The role of three-dimensional printing in healthcare and medicine. Materials & Design, 194, 108940, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108940>.
- Goh, G.D., Agarwala, S., Goh, G.L., Dikshit, V., Sing, S.L. ve Yeong, W.Y. 2017.** Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. Aerospace Science and Technology, 63, s. 140-151, Erişim adresi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.019>.
- Henton, D. E., Gruber, P., Lunt, J. ve Randall, J. 2005.** Polylactic acid technology. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, 16, 527-577.
- Kale S. 2016.** Ağırlığı azaltılmış fren pedalı tasarımı ve test düzeneği geliştirilmesi (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim kurulu başkanlığı tez merkezi veri tabanından erişildi. (Tez Numarası: 425712).
- Krishnaiah, K. ve Shahabudeen, P. (2012).** Applied design of experiments and taguchi methods. [Adobe Acrobat Reader sürümü]. Erişim adresi: <https://eko.staff.uns.ac.id/files/2014/09/Buku-Alternatif.pdf>.
- Lee, C-Y. ve Liu, C-Y. 2019.** The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. Additive Manufacturing, 25, s.196-203, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.012>.
- Lee, J.Y. An, J. ve Chua, C. K. 2017.** Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied Materials Today, 7, s. 120-133, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- Ligon, S. C., Liska, R., Stampfl, J., Gurr, M. ve Mülhaupt R. 2017.** Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Chemical Reviews, 117 (15), s. 10212-10290. doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-Garcia, E., Rodriguez-Santiago, M. ve Martin-Doñate, C. 2020.** Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications. Polymers, 12(10), 2202. doi:10.3390/polym12102202.

- Mohamed, O. A., Masood, S. H., ve Bhowmik, J. L. 2015.** Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42-53.
- O'Carroll, E. 2017.** Determine the mechanical properties of 3d printed polymer parts for computer modelling applications (Yüksek lisans tezi). Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/326994864_Determine_the_Mechanical_Properties_of_3D_Printed_Polymer_Parts_for_Computer_Modelling_Applications.
- Panneerselvam, T., Raghuraman, S. ve Vamsi Krishnan, N. 2021.** Investigating Mechanical Properties of 3D-Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Material Under Fused Deposition Modeling. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102, s. 375–387. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00646-8>.
- Parupelli, S., ve Desai, S. 2019.** A comprehensive review of additive manufacturing (3d printing): processes, applications and future potential. *American journal of applied sciences*, 16(8).
- Pastor-Artigues, M.-M., Roure-Fernández, F., Ayneto-Gubert, X., Bonada-Bo, J., Pérez-Guindal, E., ve Buj-Corral, I. 2019.** Elastic Asymmetry of PLA Material in FDM-Printed Parts: Considerations Concerning Experimental Characterisation for Use in Numerical Simulations. *Materials*, 13(1), 15. doi:10.3390/ma13010015.
- Sanatgar, R. H., Campagne, C. ve Nierstrasz, V. 2017.** Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. *Applied Surface Science*, 403, s.551-563, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.112>.
- Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H. ve Mülhaupt, R. 2019.** 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28, s. 152-159. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.003>.
- STM, Sektör Değerlendirme Raporu. 2015.** Katmanlı imalat teknolojileri ve havacılık uygulamaları. Erişim adresi: https://www.stm.com.tr/uploads/docs/Raporlar/1599579912_1.katmanliimalattek_nolojileriraporu2016-08-03-14-11-28.pdf.
- Sürmen. H.K. 2019.** Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), doi: 10.17482/uumfd.519147
- Szykiedans, K., Credo, W. ve Osinski, D. 2017.** Selected mechanical properties of PETG 3-D prints. *Procedia Engineering*, 177, s. 455–461, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.245>.
- Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B. Ve Roberson, D. A. 2015.** Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, 6, 16-29.
- Torrado, A.R. ve Roberson, D.A. 2016.** Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16, s. 154–164 Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0067-4>.
- Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z. ve Gordon, A.P. 2016.** An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), s. 387-404. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2014-0083>.

Turner, B.N. ve Gold, S.A. 2015. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), s. 250-261. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>.

Vladinovskis, V. 2020. Review of 3D printing technologies and considerations on their use in orthopedy. 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), s. 1-6, doi: 10.1109/RTUCON51174.2020.9316483.

Yuan, S., Shen F., Chua, C. K. ve Zhou, K. 2019. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications. *Progress in Polymer Science*, 91, s. 141-168, Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.11.001>.

Zarbakhsh, J., Iravani, A. ve Amin-Akhlaghi, Z. 2015. Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D printed structures. 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, s. 1-4, doi: 10.1109/EuroSimE.2015.7103095.

