



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİR ENDÜSTRİYEL ROBOT TUTUCU PARMAĞININ
ÜRETKEN TASARIM (GENERATIVE DESIGN) YÖNTEMİ
İLE TASARIM ARAŞTIRMASI, SONLU ELEMENLAR
YÖNTEMİ İLE DOĞRULANMASI VE OPTİMİZE EDİLMİŞ
KARBON TAKVİYELİ FİBER FİLAMANT
KULLANILARAK ERİYİK YIĞMA MODELLEMESİ (FDM)
YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

ERSİN KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilimdalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Öğrt.Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU

İSTANBUL, 2024



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



**DESIGN RESEARCH OF AN INDUSTRIAL ROBOT
GRIPPER FINGER USING THE GENERATIVE
DESIGN METHOD, VALIDATION USING THE
FINITE ELEMENT METHOD AND MANUFACTURING
IT BY THE FUSED DEPOSITION MODELLING
(FDM) METHOD USING OPTIMIZED CARBON
REINFORCED FIBER FILAMENT**

ERSİN KAYA

MASTER THESIS

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Program

Thesis Supervisor

Asst. Prof. Selim HARTOMACIOĞLU

ISTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Ersin KAYA'nın "Bir Endüstriyel Robot Tutucu Parmağının Üretken Tasarım (Generative Design) Yöntemi İle Tasarım Araştırması, Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Doğrulanması Ve Optimize Edilmiş Karbon Takviyeli Fiber Filament Kullanılarak Eriyik Yığıma Modellemesi (Fdm) Yöntemiyle Üretilmesi" başlıklı tez çalışması, 20 Şubat 2023 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Güven MERAL (Üye)

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih vesayılı kararı ile Ersin KAYA'nın Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

Günümüzün rekabetçi iş yapısı, sürdürülebilirlik, maliyet, hafiflik gibi parametreler bir ürünün tasarlanmasında kritik parametreler olmaktadır. Bu problemlerin çözümü için birçok bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sonrasında çıkan tasarım methodlarından bir tanesi de Generative Design yaklaşımıdır.

Method, yapay zeka ve bulut teknoloji kullanılarak istenen sınır şartlar için optimal sonuçları içeren tasarım alternatifleri oluşturmaktadır. Yöntemin doğayı taklit eden yapısı gereği en optimal çözümler çoğunlukla organik formlarda olmaktadır. Bu tasarımların üretilmesi geleneksel imalat yöntemleriyle mümkün olmamaktadır. Bu noktada günümüzün yenilikçi imalat yöntemlerinden eklemeli imalat karşımıza çıkmaktadır. Daha esnek ve karmaşık geometrilerin bu yöntemle üretilmesi mümkündür.

Bu yönleriyle doğanın korunması için mühendisler, minimum enerji ve kaynak sarfiyatının istemektedir. Kısıtlı zaman ve insan düşüncesi ile bu problemlerin çözülmesi kolay olmamaktadır. Bu nedenlerle, tasarımcıların ve mühendislerin ilerleyen zamanlarda Generative Design Methodunu kullanmaları kaçınılmaz olacaktır. Bu methodla tasarlanan parçaların üretilmesi için de eklemeli imalat yöntemleri kullanacaklardır. Bu düşünceler doğrultusunda çalışmamızın bu alana katkı sunacağı görülmektedir.

Tez çalışması boyunca bilgi, tecrübelerini paylaşan, fikir alışverişinde bulunduğum ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Selim HARTOMACIOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Çalışma sürecinde bana destek olan ve motive eden sevgili eşim Hatice Bostancı Kaya'ya, hayatım boyunca destek olan annem Ayşe Kaya'ya, babam Yaşar Kaya'ya, maddi ve manevi destekleri esirgemeyen Mamur Teknoloji A.Ş. ailesine sonsuz teşekkürler ederim.

Şubat, 2024

Ersin KAYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	vii
SEMBOLLER.....	ix
KISALTMALAR.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	1
2. MALZEME VE METHODLAR.....	22
2.1 Giriş.....	22
2.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	22
2.2.1 Eriyik Yığıma Yöntemi (FDM).....	23
2.2.2 Seçici Lazer Sinterleme (SLS).....	25
2.3.1 Ultimaker S3 3D İle Uygulama	26
2.3.2 EOS P 396 Yazıcı İle Uygulama	28
2.4 3D Baskı Malzemelerinin ve Proseslerinin ve Yazıcıların Karşılaştırılması.....	29
2.5 Karakterizasyon.....	30
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	34
3.1 Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu.....	34
4. GENERATİVE DESIGN.....	45
4.1 Generative Design Yazılımının Seçilmesi.....	45
4.2 Robot Tutucu Parçası.....	46
5. TUTUCULARIN SLS VE FDM METHODUYLA ÜRETİMİ.....	49

5.1 Parçaların Üretimi.....	49
6. PARÇALARIN TEST EDİLMESİ.....	51
6.1 Parçaların Test Edilmesi.....	51
7. YÖNTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI..	58
8. TARTIŞMALAR.....	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ.....	66



ÖZET

BİR ENDÜSTRİYEL ROBOT TUTUCU PARMAĞININ ÜRETKEN TASARIM (GENERATIVE DESIGN) YÖNTEMİ İLE TASARIM ARAŞTIRMASI, SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DOĞRULANMASI VE OPTİMİZE EDİLMİŞ KARBON TAKVİYELİ FİBER FİLAMENT KULLANILARAK ERİYİK YIĞMA MODELLEMESİ (FDM) YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ

Robot tutucuları endüstri çok çeşitli alanlarda kendilerine kullanım alanı bulmaktadırlar. Yine tutucu tasarımı ve seçimi robotik uygulamalarda önemli bir husus olmaktadır. Daha hafif ve dayanımı daha yüksek tutucu tasarımları istenmektedir. Böylece hem dinamik uygulamalar hemde daha küçük component seçimleri yapılabilmektedir.

Bu ürünlerin, daha çok ürüne özel tasarlanması ve üretilmesi performansları açısından önemlidir. Fakat klasik plastik enjeksiyon kalıplama tekniği ile üretilmelerinde işe özgü ürün elde etmek imkansızdır. Müşterilerin beklediği ürüne göre tutucunun geliştirilmesi ve üretilmesi elzemdir.

Bu amaçla yapılan bu çalışmada yeni nesil kompozit filament malzemesi olan karbon fiber takviyeli poliamid ile yine yenilikçi tasarım tekniği olan Generative Design tekniği ile bir robot tutucu geliştirilmiştir.

Çalışmada ilk olarak kullanılan malzemenin karakterizasyonu ve optimizasyonu yapılmıştır. Baskı parametrelerine göre üretilen standart numunelerin çekme mukavemetleri ve kırılma mekaniği incelenmiş, Taguchi deneysel tasarım tekniği optimize edilmiştir. Yine faktör analizi için ANOVA analizi yapılmıştır. Seçilen optimal parametreler ile Generative Design tekniği kullanılarak optimal geometriler elde edilmiştir.

Elde edilen geometriler SLS ve FDM tekniği üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Ayrıca geometriler Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ile nümerik analize yapılmış ve test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Sonuç olarak mevcut endüstriyel ürünlerin geliştirilmesi, daha düşük malzeme ve maliyet ile üretilibilmeleri için bir method önerilmiştir.

ABSTRACT

DESIGN RESEARCH OF AN INDUSTRIAL ROBOT GRIPPER FINGER USING THE GENERATIVE DESIGN METHOD, VALIDATION USING THE FINITE ELEMENT METHOD AND MANUFACTURING IT BY THE FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM) METHOD USING OPTIMIZED CARBON REINFORCED FIBER FILAMENT

Robot grippers find use in a wide variety of areas of industry. Again, gripper design and selection is an important issue in robotic applications. Lighter and more durable holder designs are desired. Thus, both dynamic applications and smaller component selections can be made.

It is important for these products to be designed and produced more specifically for the product in terms of their performance. However, it is impossible to obtain a specific product when produced using the classical plastic injection molding technique. It is essential to develop and produce the holder according to the product that customers expect.

In this study carried out for this purpose, a robot gripper was developed with carbon fiber reinforced polyamide, a new generation composite filament material, and the Generative Design technique, which is also an innovative design technique.

Firstly, the characterization and optimization of the material used in the study was carried out. Tensile strength and fracture mechanics of standard samples produced according to printing parameters were examined, and Taguchi experimental design uniqueness was optimized. Again, ANOVA analysis was performed for factor analysis. Optimal geometries were obtained using the Generative Design technique with the selected optimal parameters.

The resulting geometries were produced and tested using SLS and FDM techniques. In addition, the geometries were subjected to numerical analysis using Finite Element Analysis (FEA) and compared with the test results.

As a result, a method has been proposed to improve existing industrial products and produce them with lower materials and costs.

SEMBOLLER

F : Kuvvet

S/N :Sinyal / Gürültü Oranı

σ_v : Von Mises Stresi



KISALTMALAR

FDM: Fuse Deposition Method, Eriyik Yığıma Methodu

3D: Üç Boyut

PETG: Polietilen Tereftalat Glikol

CFPETG : Glikolle Modifiye Edilmiş Polietilen Tereftalat'a Karbon Elyafı Eklenerek Yapılan Güçlendirilmiş Malzeme

CFPLA: Kısa Karbon Fiberlerle Güçlendirilmiş Biopolimer Polilaktik Asit

CFR-PLA: Sürekli Fiber Takviyeli Biopolimer Polilaktik Asit

CF+ABS: Karbon Fiber Takviyeli Akrilonitril Bütadiyen Stiren

CFRP: Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Plastik

CCFR-PLA: Sürekli Karbon Fiber Takviyeli Biopolimer Polilaktik AsitG

GD: Generative Design

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

et al.: [1] ve diğerleri

CNC: Computer Numerical Control

RCTR: Yeniden Yapılandırılabilir Sürekli Takip Robotu

Eİ: Eklemeli İmalat

CF15 + PA: %15 Karbon Fiber Destekli Polyamid

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Karbon Fiber Oranına Göre Çekme Mukavemeti.....	2
Şekil 1.2 CF-PLA Filament Oranına Göre Çekme Mukavemeti.....	3
Şekil 1.3 Ekstruder Tasarımları.....	4
Şekil 1.4 G.D. ile Üretilen Protez Ayak.....	8
Şekil 1.5 G.D. ile Üretilen Gidon.....	10
Şekil 1.6 G.D. ile Tasarlanan İnsansız Hava Araçları için İniş Takımı.....	10
Şekil 1.7 G.D. ile Tasarlanan ve Cnc İşlemeyle Hafifletilmiş Radyal Motor Rodu.....	11
Şekil 1.8 G.D. ile Tasarlanan Dron Çerçevesi.....	12
Şekil 1.9 G.D. ile Tasarlanan Mekanik Pedal.....	12
Şekil 1.10 G.D. ile Delta Robot Kol Tasarımı.....	13
Şekil 1.11 G.D ile Bilgisayar Sehpa Tasarımı.....	14
Şekil 1.12 G.D. ile Kitap Desteği Tasarımı.....	14
Şekil 1.13 GD ile Tasarlanan ve Karbon Fiberli Filament ile Üretilmiş Tutucular.....	15
Şekil 1.14 GD İle Tasarlanan Robotik Kol.....	16
Şekil 1.15. GD İle Tasarlanan Rüzgar Türbin Yatağı.....	16
Şekil 1.16 GD İle Tasarlanan ve SS 316L Tozuyla Üretilen Robotik Kol.....	17
Şekil 1.17 GD İle Tasarlanan RCTR Parçaları ABS Filament ile Üretilmiş Tutucular...17	
Şekil 1.18 Topoloji Optimizasyonu İle Robot Gövdesinde Ağırlık Hafifletme.....	18
Şekil 1.19 GD İle Tasarlanan Robotik Tutucu Kolu.....	18
Şekil 1.20 Elektrikli Araç Kapı Mentеше GD Uygulaması.....	19
Şekil 1.21 Femur kemiği GD Uygulaması.....	19
Şekil 1.22 Otomobil çekici parçası Gd ile tasarımı.....	20
Şekil 2.1 FDM Sematik Görünümü.....	23
Şekil 2.2 Eİ İle Üretilen Delta Robot Kolu	24

Şekil 2.3 Eİ İle Üretilen Robot Parmağı	24
Şekil 2.4 Eİ ile Üretilen Otomobil A Kolu Parçası.....	25
Şekil 2.5 Seçici Lazer Sinterleme Mekanizması.....	25
Şekil 2.6 GD Ve SLS Yöntemyle Üretilen Direksiyon Parçası.....	26
Şekil 2.7 Ultimaker S5 3D Printer.....	27
Şekil 2.8 EOS P 396 SLS Yazıcı.....	28
Şekil 2.9 Üretilen Standart Numunelere Ait Şekil ve Ölçüleri.....	31
Şekil 3.1. Numunelerin Çekme Testi Grafikleri.....	34
Şekil 3.2. Çekme Testi Uygulanan Numunelerin Kırılma Davranışı.....	36
Şekil 3.3. SEM Fotoğrafları.....	37
Şekil: 3.4. Deneye ait 3d yüzey topografyası ve Optik Görüntüsü.....	38
Şekil 3.5. Numunelerin Ağırlık Ortalaması.....	39
Şekil 3.6. Numunelerin Çekme Mukavemet Ortalaması.....	39
Şekil 3.7. Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Ortalaması.....	39
Şekil 3.8. Numunelerin Young Modül Ortalaması.....	40
Şekil 3.9. Numunelerin Elongation at Brake Ortalaması.....	40
Şekil 3.10. Numunelerin Ağırlık Değerlerine Göre S/N oranları.....	41
Şekil 3.11. Numunelerin Çekme Mukavemeti Değerlerine Göre S/N oranları.....	41
Şekil 3.12. Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerlerine Göre S/N oranları.....	42
Şekil 3.13. Tahmin Edilen Ağırlık Değerleri.....	43
Şekil 3.14. Tahmin Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri.....	43
Şekil 3.15. Tahmin Edilen Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri.....	43
Şekil 4.1. Autodesk Fusion 360 GD Modülü.....	45
Şekil 4.2. Çalışılan Endüstriyel Robot Tutucu Parmağı.....	46
Şekil 4.3. GD Modülü ve Tutucunun Tanımlamaları.....	47

Şekil 4.4. Üretilen geometri alternatifleri.....	48
Şekil 5.1. FDM Yöntemi ve PA+CF Filament İle Basılan Parçalar.....	50
Şekil 5.2. SLS Yöntemi ve PA2200 Toz İle Basılan Parçalar.....	50
Şekil 6.1. FDM ve SLS ile üretilen Deney Numuneleri.....	51
Şekil 6.2. Tutucular İçin Basma Testi Düzeği ve Fiksturu.....	52
Şekil 6.3. Basma testi cihazında ürünlerin test edilmesi.....	52
Şekil 6.4. A Gevrek kırılma ve B Sünek Kırılma.....	53
Şekil 6.5. FDM Numunelerin Basma Testi Grafikleri.....	54
Şekil 6.6. SLS Numunelerin Basma Testi Grafikleri.....	55
Şekil 6.7. FDM S1 Numunesinin 1 mm Sehimde Taşıyabileceği Kuvvetin FEA Analizi.....	56
Şekil 6.8. SLS S4 Numunesinin 1 mm Sehimde Taşıyabileceği Kuvvetin FEA Analizi.....	56
Şekil 7.1. Endüstriyel Gripper Tutucunun GD Uygulaması.....	60

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Araştırılan Literatürlerin Malzeme İçerikleri ve Çalışılan Parametreler.....	7
Tablo 1.2 Literatürde GD Çalışmaları ve İçerikleri.....	21
Tablo 2.1 Yazıcının teknik özellikleri.....	21
Tablo 2.2 EOS P 396 Teknik Veriler.....	21
Tablo 2.3 Yazıcının Teknik Özelliklerini Karşılaştırılması.....	21
Tablo 2.4 Proseslerin Karşılaştırılması.....	21
Tablo 2.5 Kullanılan Malzemeye Ait Mekanik Özellikler.....	21
Tablo 2.6 Seçilen deney parametreleri ve seviyeleri.....	21
Tablo 2.7 Seçilen L9 Orthogonal Array Eşleşmesi.....	21
Tablo 3.1 Ağırlık, Çekme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü İçin Yapılan ANOVA Çalışması.....	44
Tablo 5.1 PA 2200 Tozu Mekanik Verileri.....	49
Tablo 6.1 1 mm Şhimde Kuvvet Taşıma Kapasitesi.....	54
Tablo 7.1. Parçaların Ekonomik ve Teknik olarak Kıyaslanması.....	58

1.GİRİŞ

Artan otomasyon hacmiyle beraber, bu alanda kullanılan ekipmanların tasarım ve kullanım alanları genişlemektedir. Bununla beraber bu çalışmadaki gibi daha hafiflik istenen tutucu tasarımları gerekmektedir [26]. Geleneksel imalat yöntemleri parça tasarımına belli kısıtlamalar getirmektedir [35]. Günümüzde bu kısıtlamalardan dolayı eklemeli imalat yöntemleri gelişme göstermektedir.

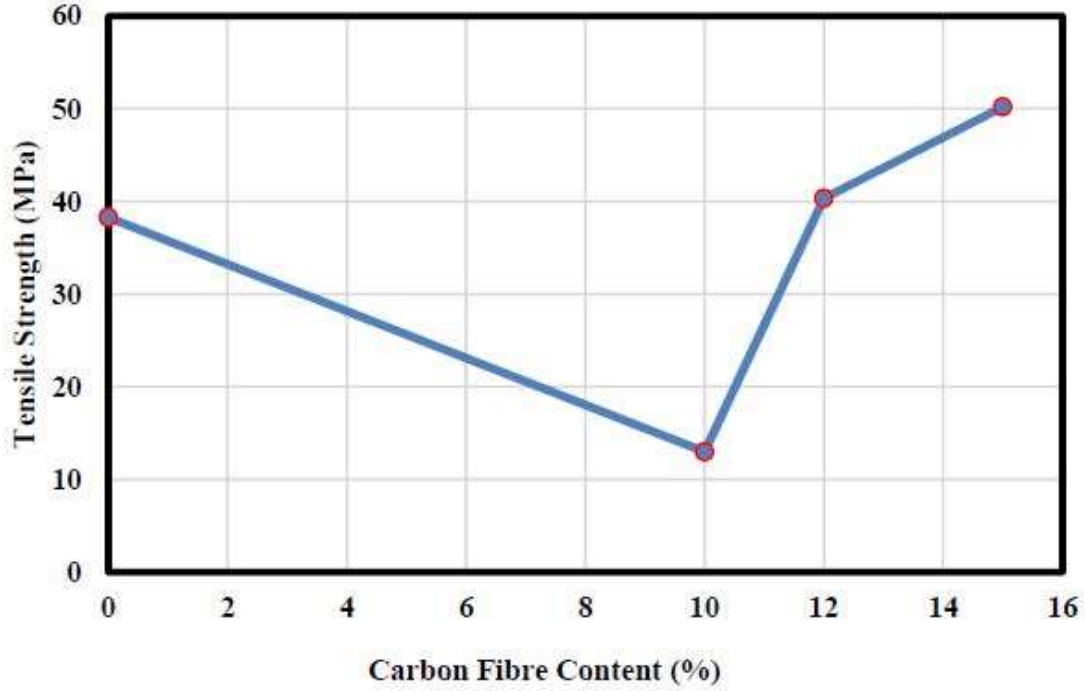
Filament tarafında ise literatürde güçlü yanı sebebiyle birçok karbon fiber takviyeli filamentin Fuse Deposition Method (FDM) yöntemiyle üretilme parametrelerinin optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Filamentin içindeki karbon fiber oranının mekanik özellikleri etkisi önemli olmaktadır [1]. 3D yazıcılar için proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde kritik etkisi vardır ve bu parametreler bulunmasında yapılan deneylerde Taguchi yöntemi kullanılabilir [2,4]. Optimum proses parametreleri dolgu oranı, katman yüksekliği, doluluk oranı ve dolgu tipi gibi parametrelere bağlıdır [5].

Generative Design (GD) konusunu ele aldığımızda, son zamanlarda yapay zeka ile mekanik parçaların tasarımında teknolojik olarak yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Tasarımcılar bilgisayar ortamına tasarlanacak olan parçanın gerekli sınır ve yükleme koşullarını girerek parça modellemesinde bu teknoloji kullanabilmektedirler. Üretken tasarım yöntemi kısa süre içinde çoklu iterasyon yaparak tasarımcıya örnekler sunar. Yapay zeka bulut teknolojisiyle beraber mekanik sınırlama, yükleme koşullarına bağlı olarak farklı malzeme ve üretim metodlarına göre birçok tasarım örneği ortaya koyabilmektedir. GD yazılımı; istenen sınırlama ve yüklemelerdeki tasarım için, üretim yöntemleri ve malzemeler için topoloji optimizasyonu kullanarak tasarım alternatiflerini oluşturur. Ortaya çıkan sonuçlar klasik tasarımlardan farklı olmakla beraber istenilen mukavemet, hafiflik ve daha birçok yönlü tasarım ile, tasarımcıya sunulmaktadır [18,19].

1.1 Literatürde Araştırması

Çalışmamızın ilk aşamasında Fuse Deposition Method (FDM) için yazdırma parametrelerinin proses optimizasyonu yapılmıştır. Literatür incelendiğinde bir çok karbon fiber takviyeli filamentin FDM yöntemiyle üretilme parametrelerinin optimizasyonu yapıldığı görülmektedir. Fakat optimize edilen parametrelerle üretilmiş herhangi bir uygulamaya dönük parça bulunmamaktadır.

Filamentleri incelediğimizde, filamentin içindeki karbon fiber oranının mekanik özellikleri etkisi önemli olmaktadır. Karbon fiber oranına artışına paralel olarak çekme, eğilme, mikro sertlik, elastisite modülü ve cam geçiş sıcaklığı gibi termo-mekanik özellikleri artırmaktadır. Optimal karbon fiber oranının ağırlıkça %15 olduğu görülmüştür [1].



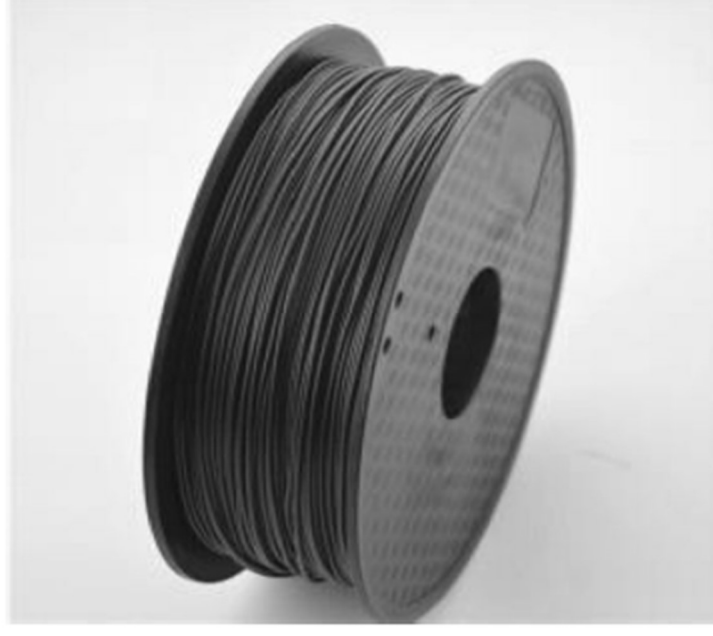
Şekil 1.1. Karbon Fiber Oranına Göre Çekme Mukavemeti [1]

Yine 3D yazıcılar için proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde kritik etkisi vardır ve bu parametrelerinin optimizasyonunda yapılan deney tasarımı Taguchi yönteminin kullanıldığı görülmektedir [2,4].

Çalışmamızda ardıl işlem olarak ısıl işlemin mekanik veriler üzerindeki etkisi incelenmektedir. Literatürde ısıl işlemin mekanik özellikler üzerinde etkisi, tavlama numunelerin daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu şeklindedir. K. Sathish Kumar et al., çalışmada tavlama işlemiyle modifiye edilmiş Polietilen Tereftalat'a Karbon Elyafı Eklenerek Yapılan Güçlendirilmiş (CFPETG) filamentin sertlik, çekme, darbe ve eğilme mukavemetinde artışlar tespit etmiştir ve bu filamentin orta yüklerdeki uygulamalarda kullanılabileceği söylemiştir [3].

M. Kamaal et al., yaptığı FDM proses optimizasyonunda, optimum proses parametrelerinin dolgu oranı, katman yüksekliği ve dolgu yönü gibi parametrelere bağlı olduğunu görmüştür. Yaptığı optimizasyon çalışmada Kısa Karbon Fiberlerle

Güçlendirilmiş Biopolimer Polilaktik Asit (CFPLA) filamentinin çekme dayanımı için, katman yüksekliği ve dolgu yüzdesi bağlı olduğu görülmüştür. İzod testi sonuçlarına göre tabaka yüksekliğinin mukavemeti çok fazla etkilemediği görürken; yapı yönü ve dolgu yüzdesi ise mukavemeti büyük ölçüde etkilediği tespit etmiştir [5].



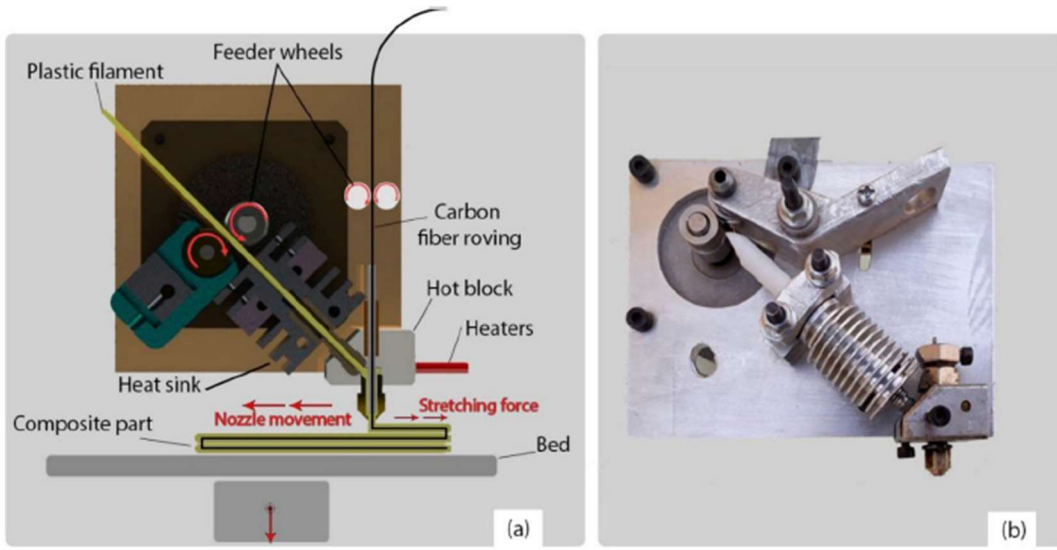
Şekil 1.2. CF-PLA Filament [5]

Literatürdeki yapılan bir başka çalışmada (Lee ve Wu 2020), Taguchi deney tasarımı yaklaşımını kullanarak Sürekli Fiber Takviyeli Biopolimer Polilaktik Asit (CFR-PLA) parçalarının 3D baskısında çeşitli işleme parametrelerinin etkisini araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yatak sıcaklığının, CFR-PLA baskılı parçaların çekme mukavemetini etkileyen en önemli parametre olarak bulunurken, yatak sıcaklığı ve baskı oryantasyonunun, darbe mukavemetini etkileyen en önemli parametreler olduğu görülmüştür. Diğer taraftan 45 derece oryantasyonlu baskılı parçalar, 90 derece baskılı parçalara kıyasla üstün mekanik mukavemet göstermiştir. Son olarak daha yüksek doldurma yoğunluğu, baskının iç kısmında daha yüksek derecede plastiğin sıkıştırıldığından, bunun sonucunda daha güçlü bir basılı parça olduğunu görülmüştür. Diğer yapılan gözlem basılan parçaların mekanik mukavemetleri, nozul sıcaklığıyla birlikte azalmıştır [6].

M.S. Srinidhi et al., çalışmasında karbon fiber oranı, dolgu deseni ve tavlamanın etkisinin 3D PETG baskı parçalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Karbon fiber ve stres giderme nedeniyle CFPETG numuneleri daha yüksek mekanik mekanik

özellikler göstermiştir. Yine ızgara deseninin diğer dolgu desenlerine göre en yüksek mekanik değerler vermiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda malzemenin otomotiv ve havacılık bileşenlerinin çeşitli uygulamalarında kullanılması için tavsiye edilmiştir [7].

Karbon fiber içeriğinin mekanik verileri olan etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada (M. Heidari et al.) kendi yaptıkları ekstruderle uzun karbon fiber elyafları pva ile ön hazırlık yaparak ve sonrasında PLA birleştirerek numunelere bir dizi mekanik testleri tabi tutmuşlar. Alınan test sonuçlarına göre mekanik verilerde (üç noktadan test gibi) önemli derecede artışın olduğu buna karşın malzemenin kırılma hızının arttığı tespit etmişlerdir [8].



Şekil 1.3. Ekstruder Tasarımları [8]

Isıl tavlamanın ve yardımcı ısıtmanın etkisinin araştırıldığı bir diğer çalışma Ning Yu et al., Karbon Fiber Takviyeli Akrilonitril Bütadiyen Stiren (CF+ABS) filamentin üzerinde yaptığı testlerde yapılan yardımcı ısıtmanın parçaların çarpıklığı giderdiği ve mekanik verilerinde çekme (mukavemeti gibi) iyileşmeler olduğu görmüştür [9].

M. Ajay Kumar et al., 3d yazıcıların proses parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde etkisinin incelendiği çalışmasında Taguchi L9 deneysel yaklaşımını, karbon fiber takviyeli PETG numuneleri üzerinde deneyi planlamak ve yürütmek için kullanmıştır. Numuneler, baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve katman yüksekliği gibi etkili makine parametreleri değiştirilerek yazdırılmıştır. Baskı hızı ve dolgu yoğunluğunun çekme mukavemeti ve sertlik üzerinde bireysel ve eşzamanlı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Katman yüksekliği ve dolgu yoğunluğunun eğilme mukavemeti üzerinde büyük etkisi olduğu

görülmüştür. Alınan sonuçlar, medikal, havacılık, otomobil vb. gibi çeşitli alanlarda kullanılan karbon fiber PETG baskılı numunelerin çekme, eğilme mukavemeti ve sertlik gibi mekanik değerlerinin tahmini için kullanılabilmesi görülmüştür [10].

P. Sethu Ramalingam et al., darbe dayanımına dolgu şeklinin etkisinin incelendiği çalışmada, dayanıma etki eden en önemli faktörden birinin dolgu şekli olduğu görülmüştür [11].

Vinayak C. Gavali et al., karbon fiber içeriğinin üretilen parçalar üzerine etkisini incelediği çalışmada saf PLA numunesi ile karşılaştırıldığında, PLA'ya ağırlıkça %15 oranında karbon fiber eklenmesi, çekme mukavemetini %32 oranında artışa sebep olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %15 karbon fiber içeriğine sahip Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Plastik (CFRP) kompozit numunenin, saf PLA numunesine kıyasla eğilme mukavemeti %22 artmıştır. Ağırlıkça %15 karbon fiber içeriğine sahip numune, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından en büyük ortalama değere sahip olduğu görülmüştür ve karbon fiber içeriği ağırlıkça %20'ye yükseldiğinde bu değer azalmıştır. Optimal olarak ağırlıkça %15 CFRP kompoziti daha yüksek termal stabiliteye ve daha iyi fiber-matriks ara yüzey bağına sahip olduğu görülmüştür [12].

Yine Carlos Belei et al., mekanik veriler için yaptığı proses optimizasyonunda katman yüksekliği ve baskı yatağı sıcaklığının FDM yönteminde en etkili parametreler olarak bulmuştur, ekstrüzyon sıcaklığı ve baskı hızı sonuç üzerinde daha düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [13].

Fuda Ning et al., yaptığı çalışmada, karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) filament için, FDM yönteminin proses parametrelerinin (raster açısı, dolgu hızı, meme sıcaklığı ve tabaka kalınlığı dahil) etkilerini, parçaların çekme dayanımı özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tarama açısının önemli bir derecede etkin, dolgu hızının artışına paralel olarak mukavemetin düştüğü, nozul sıcaklığında 220 °C altında ve üstünde mukavemeti düşürdüğü, ve katman kalınlığının azalmasıyla mukavemetin arttığı buna karşın tokluğun düştüğü gözlemlenmiştir [14].

İncelediğimiz diğer çalışmada M. Heidari-Rarani et al., kendi tasarladığı ekstruderle PLA filamentine sürekli fiberli karbon ilave ederek, oluşan kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirme yapmıştır. Alınan sonuçlara göre, Sürekli Karbon Fiber Takviyeli Biopolimer Polilaktik Asit (CCFR-PLA)'in çekme ve eğilme mukavemetlerinin

saf PLA'ya kıyasla artışın olduğu görülmüştür. Böylece robotik ve otomotiv endüstrileri gibi farklı uygulamalar için tasarlanan yazıcı ile yüksek performanslı kompozit parçalar üretilebileceğini belirtmiştir [15].

Çalışmamızın ilk kısmının son makalesinde incelediğimiz çalışmada C. Abeykoon et al., çalışmasında printer malzeme optimizasyonlarında beklentisi üzerine, %100 dolgu yoğunluğu ile basılan parçalar en yüksek young modülünü olduğunu tespit etmişlerdir, ayrıca dolgu yoğunluğu azaldıkça basılan parçaların mukavemeti de azalmıştır [16].

Aynı çalışmada test edilen yedi dolgu deseninden (diamond, moroccanstar, catfill, sharkfill, hexagonal, ve Hilbert), doğrusal desenli olan, diğer desenlere göre ayrı katmanlar arasındaki daha küçük boşluklardan dolayı en yüksek çekme modülüne sahip olduğu görülmüştür [16]. Çalışmada çıkan sonuçlara göre genel olarak, ayarlanan yazdırma parametrelerinin parçanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Baskı hızının ve filamentlerin uygun şekilde erimesini sağlamak ve ayrıca malzeme katılma sürecini kontrol etmek için ayarlanan meme sıcaklığı iyi eşleştirilmesi gerektiği görülmüştür [16].

Çalışmanın ilk aşamasında incelenen literatür araştırmaları Tablo 1.1'deki gibi tasnif edilmiştir. Tablo'ya göre çekme test standardı olarak ASTM D638 kullanılmıştır, proses parametrelerinden nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, dolgu tipi, ısı tavlama gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında robot tutucusu için yenilikçi tasarım yöntemi olan Generative Design (GD) çalışması yapılmaktadır. GD için literatüre baktığımızda çeşitli alanlarda çok değişik uygulamalarının yapıldığı görmekteyiz. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi inceleyebiliriz.

Literatürdeki ilk çalışmamız protez endüstrisinde bir protez ayak için alternatif tasarım araştırmasıdır. Protez ayaklar, ayağa uygun şekilde oturmasını sağlamak için uygun ölçümlerle her kişi için özel olarak tasarlanmaktadır. Bu durum, bu protezlerin üretim süresini ve maliyetini arttırır. Maliyetteki bir diğer artış ise malzeme seçimi ile birlikte gelir. Protez bir bireyin ağırlığını taşıyacak kadar dayanıklı ve normal işleyişine engel oluşturmayacak kadar hafif olmalıdır. S. Rajput et al., çalışmasında Generative Design ile protez ayak tasarlamıştır. Bu yöntemin avantajları, en uygun olan tasarımı seçebilmemiz ve ihtiyaçlarımıza göre tasarım yapabilmemizdir [17].

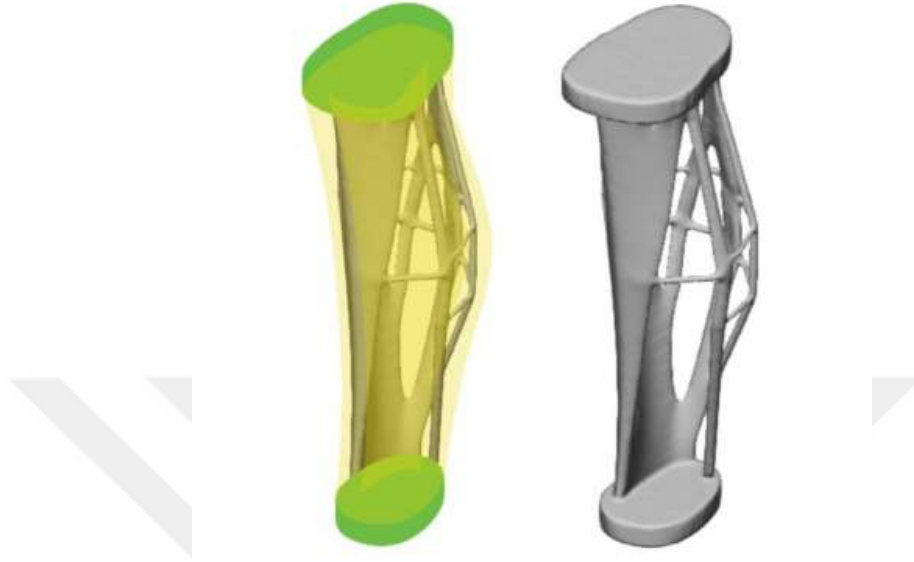
Tablo 1.1 Araştırılan Literatürlerin Malzeme İçerikleri ve Çalışılan Parametreler

Sıra No	Yöntem	Malzeme	Çalışılan Parametreler	Çekme Gerilmesi Standart
1	FDM	CF+PLA	Karbon Fiber İçeriğinin Etkisi	ASTM D638
2	FDM	CF+PLA	Katman Kalınlığı, Doldurma Şekli, Nozul Sıcaklığı	ASTM D638
3	FDM	PETG AND CFPETG	Doldurma Yoğunluğu, Karbon Fiber İçeriğinin Etkisi, Isıl Tavlamanın Etkisi	ASTM D638
4	FDM	CF+PLA	Doldurma Yoğunluğu, Yazdırma Hızı, Katman Kalınlığı	ASTM D638
5	FDM	CF+PLA	Yapı Yönü, Doldurma Yoğunluğu, Katman Kalınlığı	ASTM D638
6	FDM	CF+PLA	Yapı Yönü, Dolgu Yoğunluğu, Yatak Sıcaklığı, Nozul Sıcaklığı, Yazdırma Hızı,	ASTM D638
7	FDM	PETG AND CFPETG	Karbon Fiber İçeriği, Isıl Tavlama, Baskı Deseni	ASTM D638
8	FDM	CCFR-PLA	Karbon Fiber İçeriği,	ASTM D638
9	FDM	CF+ABS	Karbon Fiber İçeriği, Isıl Tavlama,	ISO 527-2:2012
10	FDM	CF+PETG	Baskı Hızı, Dolgu Yoğunluğu, Katman Yüksekliği,	ASTM D638
11	FDM	ONYX-GLASS FİBER	Doldurma Yoğunluğu, Dolgu Tipi,	
12	FDM	CF+PLA	Karbon Fiber İçeriği	ASTM D638
13	FDM	CF+PLA	Baskı Hızı, Yatak Sıcaklığı, Nozul Sıcaklığı, Katman Kalınlığı	ISO 527 I-BA.
14	FDM	CFRP	Raster Açısı, Baskı Hızı, Nozul Sıcaklığı, Katman Kalınlığı	ASTM D638
15	FDM	CCFR-PLA	Karbon Fiber İçeriği	ASTM D638
16	FDM	CFR-PLA; PLA	Dolgu Yoğunluğu, Dolgu Patterni, Yazma Hızı, Nozul Sıcaklığı	ASTM D638

Çalışmanın diğer aşamasında protezin üretimi için, FDM tekniğiyle ve siyah renkli ABS filament kullanılarak üretilmiştir [17].

Çalışmada sonuçlara baktığımızda protez ayak ve baldır için alternatif bir tasarım önerilmiştir. Nihai ürün daha hafif, daha az sayıda parça olması nedeniyle daha az aşınma ve yıpranma olacağı söylenmiştir. Bu tür karmaşık kafes yapılı protezleri basmak için

eklemeli imalat tekniğinin seçilmesi önerilmiştir. Optimize edilmiş protezin nihai ağırlığı 321.5 g'dır, bu da onu protez bacak için çok hafif ve uygun bir aday haline getirmiştir [17].



Şekil 1.4. G.D. ile Üretilen Protez Ayak [17]

Bir diğer literatür araştırmamızda E. Toptaş çalışmasında bisiklet gidonuna alternatif bir tasarım araştırması yapmıştır. Tasarım Autodesk'in yapay zeka destekli bir program olarak çalışan Fusion 360 CAD programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu program ile temel CAD verileri girilmiş ve istenilen kısım yapay zeka desteği ile dizayn edilmiştir [18].

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde alüminyum malzemeden elde edilen en hafifidir ve buna bağlı olarak üretim maliyetinde en düşüktür. Oluşturulan modelde oluşabilecek maksimum gerilme 53,5 MPa ve güvenlik faktörü 4,49 olduğu için tasarımcı tarafından tercih edilmesi mümkün olduğu görülmüştür. Araştırmacı çalışmasında istenilen koşullarda, istenilen mekanik mukavemet ve hafifliği sağlayan bir modelin oluşturulması sağlanmıştır [18].

Çalışmadan çıkan sonuçlara göre, Generative Design yöntemiyle istenilen koşullar altında kısa sürede çoklu tasarım örnekleri tasarımcıya sunulduğu görülmüştür. Bu sayede yapay zeka uygulamaları, tasarım için gerekli olan mekanik sınırlamalara ve yük koşullarına bağlı olarak farklı malzemeleri deneyerek istenilen mekanik dayanım ve üretim tarzlarına göre birçok tasarım örneğini ortaya koyulabilmektedir. Ortaya çıkan ürünler, daha önce tasarım sürecinde kullanılan girdiler ve çıktılar olan makine öğrenmesi yoluyla programa

öğretilir. Bu sayede yazılım, tasarımcının istediği sınır koşulları altında topoloji optimizasyonunu kullanarak üretim yöntemini hesaplayarak farklı malzemeler üzerinde tasarım sürecini oluşturur [18].

Diğer yönleriyle tasarımcılar veya mühendisler tasarım parametrelerini (malzeme, boyut, ağırlık, güç, üretim yöntemleri gibi) tanımlar ve Generative Design yazılımı, yüzlerce hatta binlerce tasarım seçeneği oluşturarak tüm olası çözüm kombinasyonlarını hızla aramaktadır. Bu sayede tasarımcının bu karmaşık mühendislik problemlerini çözmesi için yenilikçi bir yaklaşım tarzı ortaya çıkmaktadır. Modern mühendislik sistemlerinin gelişimi, zamanla artan karmaşıklığı ve belirsizliği beraberinde getirmiştir. Klasik yaklaşımla bu belirsizlikleri gidermek bazen çok zaman alabileceği ifade edilmiştir. [18].

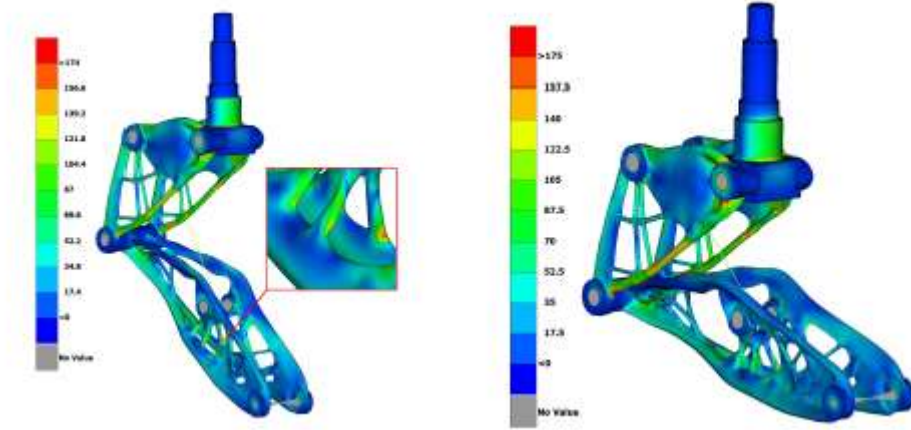
Buradan hareketle tasarımcılar veya mühendisler, ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılayacak sonuçları Generative Design programlarından filtreleyebilir ve seçebilir. Araştırmacı yakın gelecekte, her gün kullandığımız eşyalar, seyahat ettiğimiz araçlar, günlük çalışma ortamımızın düzeni ve daha fazlasının Generative Design kullanılarak oluşturulabileceği söylemiştir [18].

Havacılık alanındaki bir çalışmada insansız hava aracının iniş takımının parçaların için Generative Design çalışması yapılmıştır. Parçalar, uçağın geri kalan parametrelerine yüksek derecede bağımlı olması nedeniyle tasarlanacak son parçalardan biridir, bu nedenle düşük ağırlık ve yeterli yapısal özellikleri koruyarak uygun tasarıma ulaşmak önemlidir. Yapılan çalışmada Fusion 360 Autodesk paketi kullanarak bilgisayar destekli Generative Design kullanılmıştır. Tasarım yaklaşımı, organik şekilli, optimize edilmiş çözümler ürettiği için standart olandan parçalarda daha basit olduğu görülmüştür [19].



Şekil 1.5 G.D. İle Üretilen Gidon [18]

I. Zaimis et al., sonraki aşamada çalışmasındaki parçaları CNC üç eksen işleme kullanılacak şekilde imalat yöntemi ayarlayarak, bir insansız hava aracının iniş takımları GD ile tasarlayarak, parçaların toplamında %36 lık bir hafifletme yapmıştır. Generative Design'in geliştikçe ve 3D baskı göz önüne alındığında, çalışmanın bu teknolojinin potansiyeline ve tasarım prosedürünün faydasını olacağını söylemiştir [19].



Şekil 1.6. G.D. İle Tasarlanan İnsansız Hava Araçları için İniş Takımı [19]

Araştırmacılar üretken tasarımın temel avantajının, güvenilir bir çözüme ulaşma süresinin kısa olması, geniş seçenek yelpazesi ve ayarlanabilirlik olduğunu söylemişlerdir. Generative Design ile nesnenin ağırlığını azaltılabileceğini, performansının iyileştirebileceğini, üretim süresini azaltılabileceğini ve çeşitli tasarım sorunları giderilebileceğini ifade etmişlerdir [19].

Otomotiv alanındaki bir çalışmada H. Variyavwala et al., bir radyal motorun mafsallı çubuğunu üretken tasarım metodu kullanılarak yeniden tasarlamışlar. Parçaların üretilmesinde CNC işleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre, genel olarak endüstride ve özellikle makine tasarımında Generative Design'in önemli bir rolü olduğu sonucuna varılabilir, çalışmada gerçekçi boyutlara ve sınır koşullarına dayalı bir döner motorun mafsallı çubuğunu tasarlanmıştır. Çalışma kapsamından elde edilen parçanın ağırlığındaki maksimum azalma %36,1'dir. Çalışmanın tatmin edici sonuçlar verdiği ve motorlarda kullanılmadan önce gerçek yaşam koşullarında test edilmesi gerektiği belirtilmiştir [20].



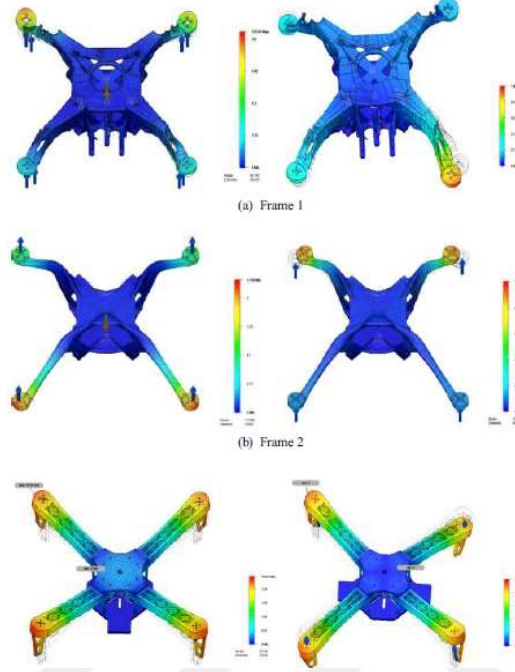
Şekil 1.7 G.D ile Tasarlanan ve CNC İşlemeyle Hafifletilmiş Radyal Motor Rodu [20]

Havacılık alanında yapılan diğer çalışmada geleneksel olarak tasarlanmış bir dron şasesinin GD ile alternatif tasarım çalışması yapılmıştır.

Dron'un şasesi, çerçeveye uygulanan bileşenlerin ağırlığı, darbelere karşı direncine vb. etkilere maruz kaldığından tasarımın en önemli parçasıdır. ABS malzeme, yüksek rijitliği, darbe direnci ve çekme mukavemeti nedeniyle seçim kriteri olmuştur ve imalat yöntemi olarak FDM tekniği ile eklemeli imalat yöntemi seçilmiştir [21].

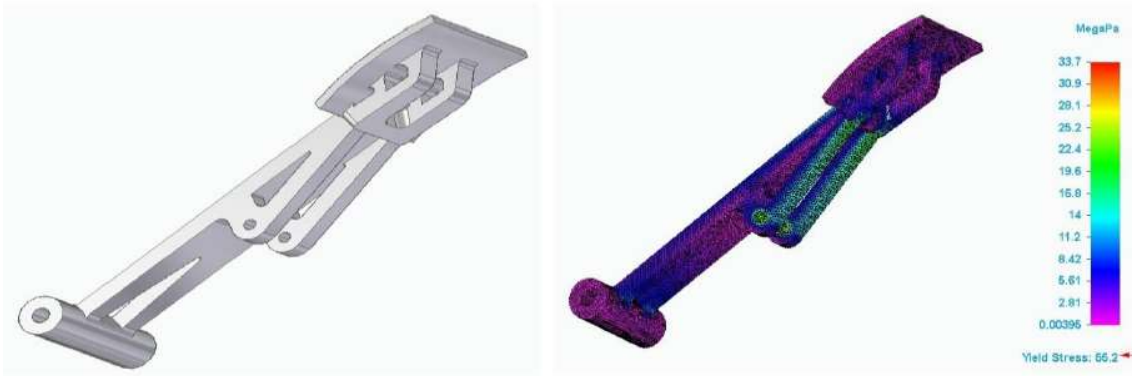
Generative Design çalışması sonrasında güvenlik faktörü ile başlayarak, oluşturan 2 çerçeveden biri orijinal çerçeye göre neredeyse 40 katı bir güvenlik faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen veri ve malzeme parametrelerinden, orijinal şasesinin hasar alma olasılığının yüksek olduğu görülmüştür. Orijinal çerçevenin Von Mises stres değeri, çerçeve 1'den 11.4 kat daha küçüktür, bu nedenle, geleneksel olarak tasarlanmış bir drone çerçevesi ile karşılaştırıldığında çerçeve 1 için akma veya kırılma direncinin daha fazla olduğu sonucuna varılır. Çerçeve 2 için yük koşulu altında maksimum yer değiştirme

sadece 0,01 mm'dir ve bu, orijinal çerçeveye göre yaklaşık 400 kat daha iyi bir sonuç olduğu görülmüştür; GD olarak tasarlanmış drone çerçevesinin deformasyona direnme kabiliyetini orijinal tasarıma göre daha iyi olduğu görülmüştür [21].



Şekil 1.8. G.D. ile Tasarlanan Dron Çerçeveleri [21]

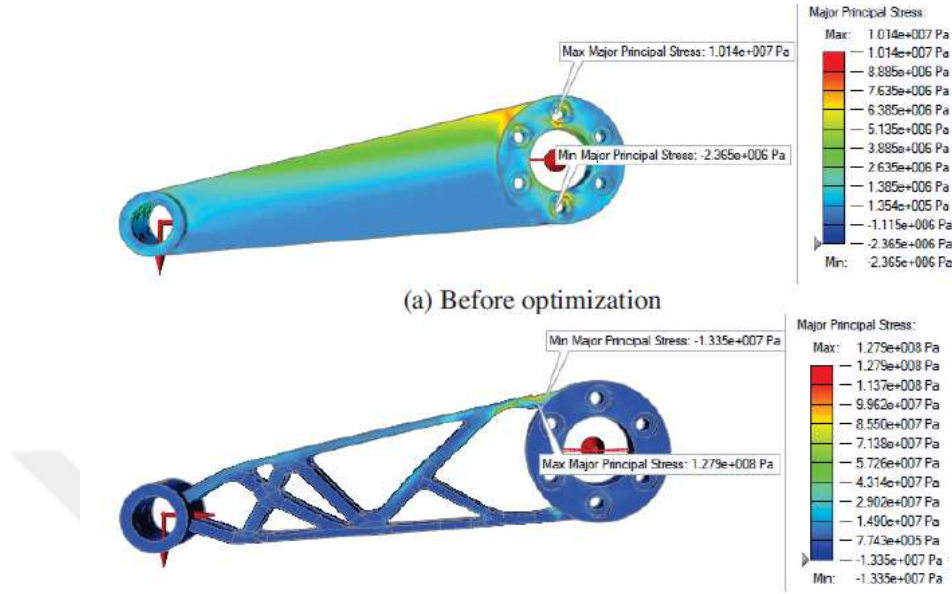
Otomotiv alanında yapılan bir GD çalışmasında M. Fenoon et al., çalışmasında bir mekanik pedala var olan tasarıma göre %40 ağırlık hafifletmesi gerçekleştirmişler [22].



Şekil 1.9. G.D. ile Tasarlanan Mekanik Pedal [22]

Robotik alanında bir çalışma incelendiğinde ise Thanh Hai Tuan Tran et al., bir delta robotunun Altair Solid Thinking Inspire programını kullanarak, robotun kolunda %48.8 ağırlık hafifletme optimizasyonu yapmıştır. Tasarlanan parçanın üretilmesinin eklemeli

imalata uygunluk sebebiyle, kol FDM tekniği ve ABS filamanet kullanılarak üretmiştir [23].



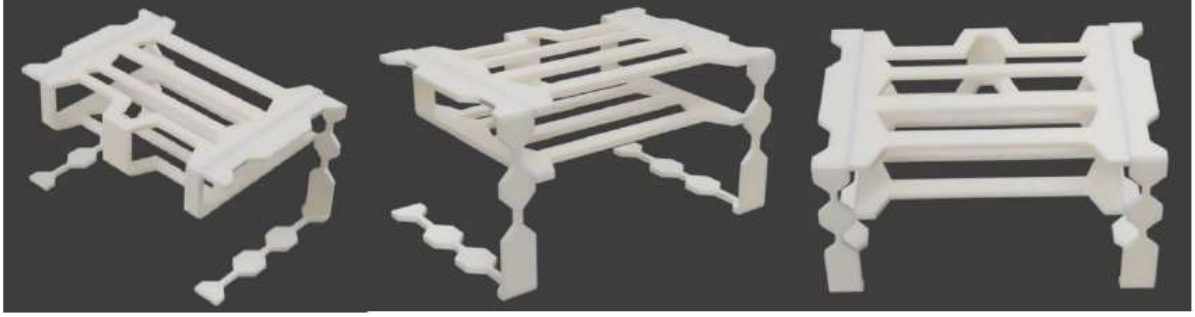
Şekil 1.10 G.D. ile Delta Robot Kol Tasarımı [23]

Endüstriyel tasarım alanındaki bir çalışmada C. Şanlıer et al., 4 kg'lık laptop sehpasında topoloji optimizasyonu ve GD çalışması yapmıştır.

Yapılan çalışmada topoloji optimizasyonu ile ürünün ağırlığı 1,796 kg'a düşmüştür, GD ile oluşturulan sehpa ise 1,116 kg ile en hafif ürün tasarlanmıştır. Yaklaşım doğaya atıfta bulunan organik tasarım önerileri oluşturmuş ve yapıların sağlamlığı analiz ile desteklenmiştir. Organik yapıların daha karmaşık geometriler olmasından dolayı yine eklemeli imalat ile üretilmesi ve polyamid malzeme kullanılması uygun görülmüştür. Eklemeli imalat ile sürecin uzun olduğu gözlemlenmiştir. Ancak hem üretim yönteminden hem de üretken tasarım aracının çok sayıda tasarım varyantı sunmasından dolayı kullanıcılar için özel ve yeğane ürüne sahip olma duygusu ürünlerin tercih edilirliliğini artırmaktadır [24].

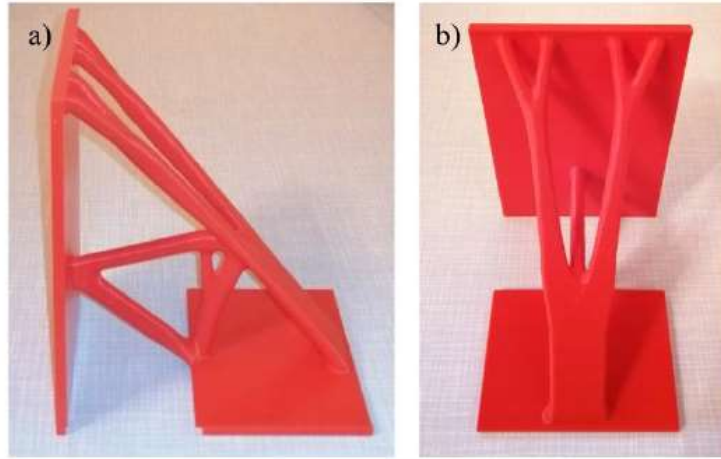
Araştırmacılara göre, bir ürünün geleneksel imalat yöntemi ile üretilmesi mevcut durumda geleneksel üretim araçlarının yaygın ve ulaşılabilir olmasından dolayı tercih edilebildiğini, ancak teknolojik gelişmeler ile eklemeli imalata da kolay ulaşım zamanla mümkün olmuştur. Bu teknolojinin etkili kullanım araçlarından topoloji optimizasyonu sadece parça eksiltmeye dayandığı için daha hafif ürünlerin tasarımını kolaylaştırmıştır. GD metodu ise algoritması sayesinde hem hafif hem de daha dayanıklı tasarım önerileri

vermektedir. GD ve eklemeli imalatın yaygınlaşmaya başlamasından sonra, daha hafif ürünler oluşturma, kullanıcıya farklı tasarım varyantları sunma, zaman, malzeme ve enerjiden daha fazla tasarruf edilmesinden dolayı daha çok tercih edilebileceği ve faydalı bir tasarım aracı olabileceğini belirtmişlerdir [24].



Şekil 1.11 G.D. İle Bilgisayar Sehpa Tasarımı [24]

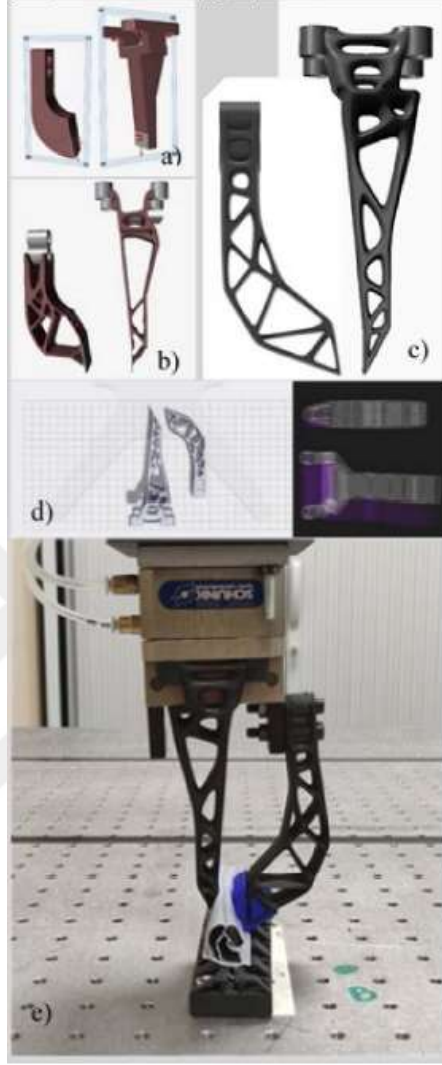
Benzer endüstriyel tasarım alanında (S. Junk, L. Burkart) değişik GD programlarını karşılaştırıp avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırması yapmışlardır. GD ile daha sonra bir tane kitap destekliğini FDM tekniğiyle, ABS filament kullanarak eklemeli imalat yöntemiyle üretmiştir. Oluşturulan modelin var olan modele göre %19,2'lik bir ağırlık hafifleme söz konusu olmuştur [25].



Şekil 1.12 G.D. ile Kitap Desteği Tasarımı [25]

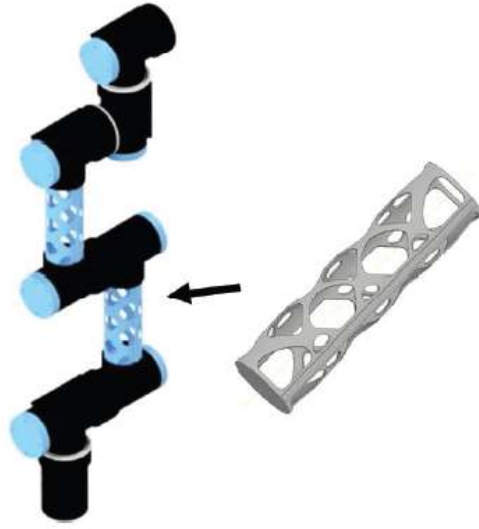
I. A. Galfarsoro et al., robotik alanında yaptıkları çalışmada işbirlikçi bir robotla buzdolabı kapı contasının sökülmesi için yenibir, iki parmaklı kavrayıcı konsepti geliştirilmiş ve bunları test etmiştir. Yapılan topoloji optimizasyonu ve karbon fiber takviyeli poliamid filament ile eklemeli olarak imal edilen parçalarla %50 daha hafif bir tutucu

oluşturulmuştur. Tasarlanan tutucuların sökme işlemi için gerekli olan 140 N kuvvetten daha yüksek çekme kuvvetlerinde çalışabileceği görülmüştür [26].



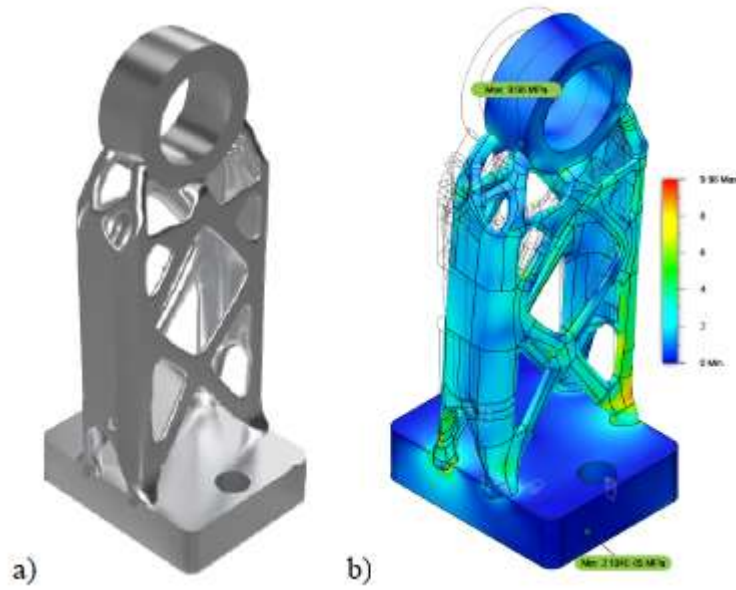
şekil 1.13 GD ile Tasarlanan ve Karbon Fiberli Filament ile üretilmiş Tutucular [26]

Literatürdeki robotik alanındaki çalışmalardan biri de (Emmanuel Francalanza, Alec Fenech, Paul Cutajar) yaptıkları çalışma bir robotik manipulatrn eklemeleri arasındaki bağlantıyı sağlayan parça için GD kullanılmıştır. Yapılan tasarım ile aynı yapısal bütünlük korunmuş ve hem ağırlık hem de yapım süresi, dolayısıyla robotik manipülatörün toplam maliyeti önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür [27].



Şekil 1.14 GD İle Tasarlanan Robotik Kol [27]

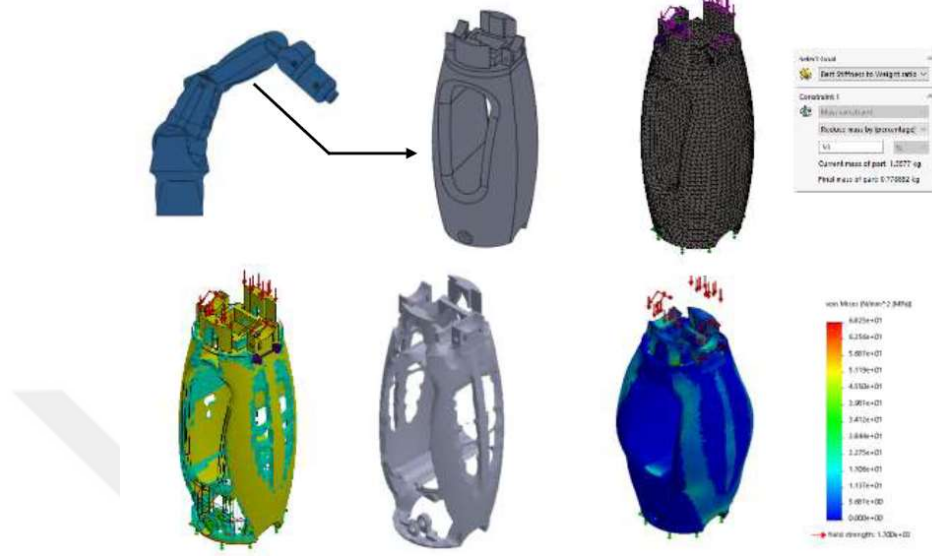
Enerji alanında yapılan çalışmada A. Lukin et al., yapmış oldukları çalışmada, magnus efektli rüzgar türbininin rulman yatağı ve flanşları için GD uygulaması yapmışlar ve rulman destek parçası için %51, flanş parçası için %55 ağırlık hafifleme söz konusu olmuştur [28].



Şekil 1.15 GD İle Tasarlanan Rüzgar Türbin Yatağı [28]

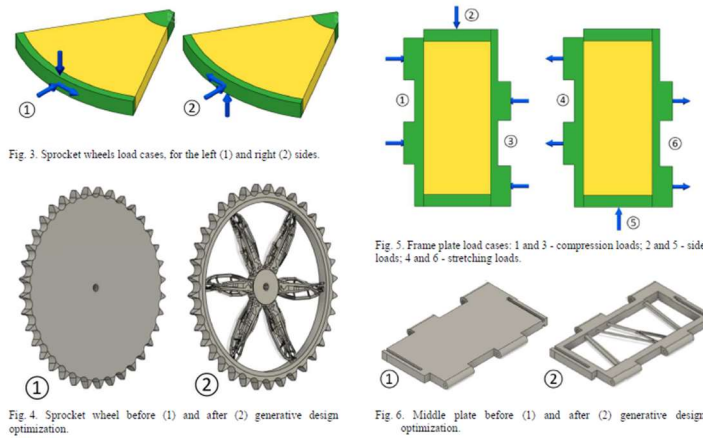
Literatürdeki diğer robotik alınındaki çalışmada (M. Kumaran, V. Senthilkumar) GD ile, SS 316L tozu kullanılarak ve metal eklemeli imalat yaparak robot kolunun ağırlık hafifletme optimizasyonunu yapmışlardır. Tasarımı değerlendirmek için mekanik

özellikler ve mikro yapılar analiz edilmiştir. Metal katkılı imalat yöntemi kullanılarak %50 ağırlık azalması olduğu görülmüştür. Metal katkılı imalatın robot kol için uygun olduğu, uzun süreli veya onarım uygulamaları için kullanılabileceği sonucuna varmıştır [29].



Şekil 1.16 GD İle Tasarlanan ve SS 316L Tozuyla Üretilen Robotik Kol [29]

Diğer bir robotik alanındaki uygulamada D. Valme et al., yaptığı çalışmada Yeniden Yapılandırılabilir Sürekli Takip Robotu (RCTR) parçaları için ağırlık optimizasyonu için GD çalışması yapmıştır ve toplamda %10.7 ağırlık hafifletmesi sağlanmıştır. Parçaların üretimi FDM tekniğiyle ve ABS filament kullanarak eklemeli olarak imal edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda daha az malzeme ve daha az baskı zamanı sağlanmıştır [30].



Şekil 1.17 GD İle Tasarlanan RCTR Parçaları ABS Filament ile Üretilmiş Tutucular

Robotik alanda yapılan diğerk bir çalışmada B. Denkena et al., yaptıkları çalışmada karbon fiber işleme için kullanılan endüstriyel robot geometrisi için topoloji optimizasyonu yapılmıştır, yapılan çalışma sonrasında robot geometrisinde hafifleme olmuştur [31].

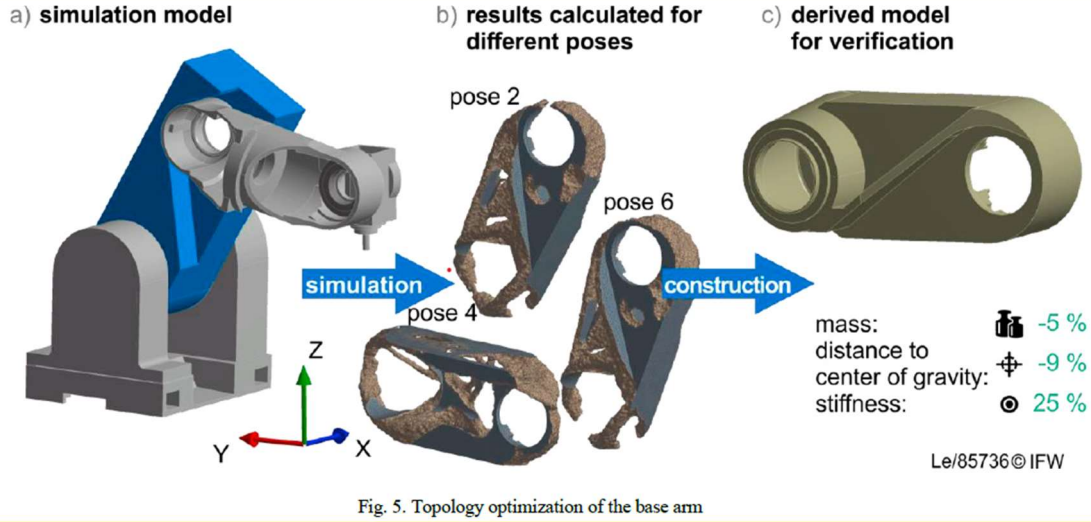
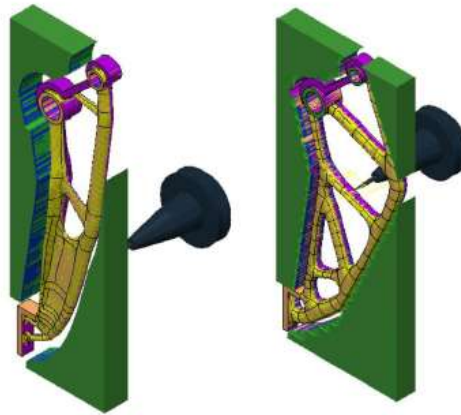


Fig. 5. Topology optimization of the base arm

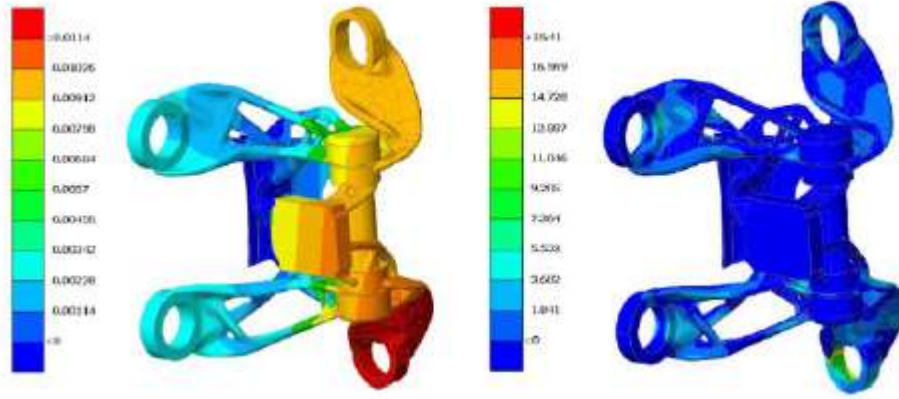
şekil 1.18 Topoloji Optimizasyonu İle Robot Gövdesinde Ağırlık Hafifletme [31]

Yine robotik alanda yapılan çalışmada F. Buonamici et al., çalışmasında 20000 N yük taşıyacak olan bir robot tutucu parmağının Autodesk Fusion 360 ile GD çalışması yapmıştır. GD sonucunda 28 tasarım çıktıında uygun olandan bir tanesi seçilmiştir. Seçilen parça için malzeme olarak A36 çeliği ve imalat yöntemi olarak CNC işleme yöntemi seçilmiştir. Sonuç olarak daha hafif yapıda parça tasarımı elde edilmiştir. Çoğunlukla tasarım çıktıları üretim kısıtları sebebiyle eklemeli imalata uygun olduğu görülmüştür [32].



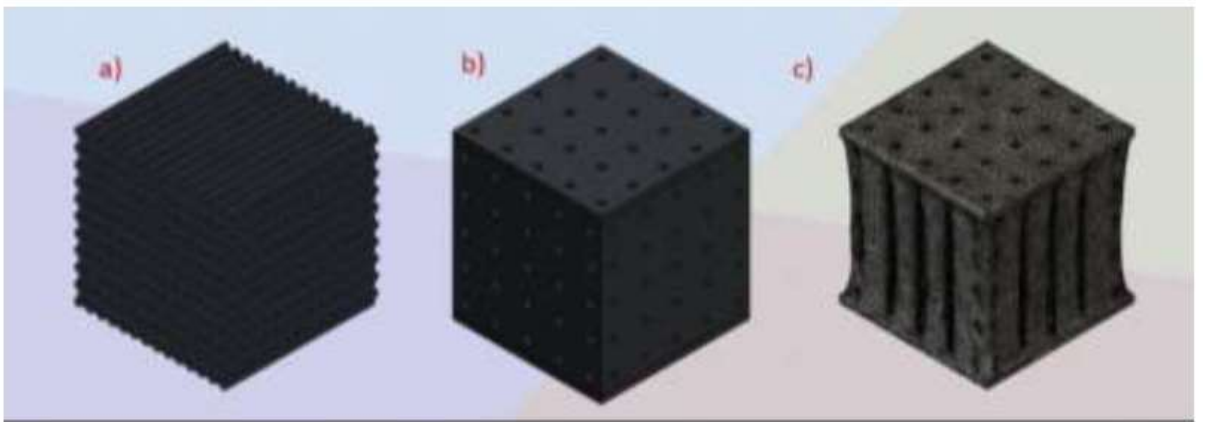
şekil 1.19 GD İle Tasarlanan Robotik Tutucu Kolu [32]

Otomotiv alanındaki başka bir çalışmada R. Petrov et al., çalışmasında, bir elektrikli aracın 200 N ağırlığındaki kapısını taşıyabilecek kapı menteşe için GD çalışması yapmıştır. Optimizasyon sonrasında parça hacmi %30 azaltılmış ve parçanın mekanik özellikleri istenen kriterleri karşılayan bir parça olmuştur. Parçanın üretimi için otomotiv endüstrisindeki maliyetlerden dolayı imalat yöntemi olarak basınçlı döküm seçilmiştir [33].



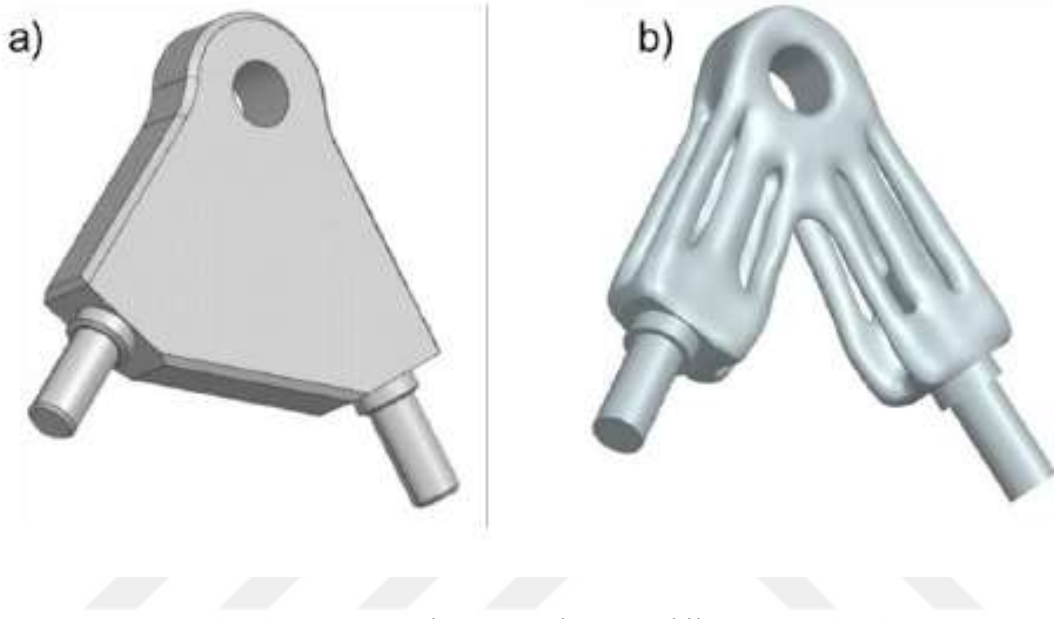
Şekil 1.20 Elektrikli Araç Kapı Menteşe GD Uygulaması [33]

Biyomekanik alanında yapılan çalışmada ise Renold Elsen S et al., yaptığı çalışmasında kemik sentezi için biyo iskelet imalatı için GD kullanmıştır. GD tasarım programı olarak Fushion 360 kullanılmıştır. 20x20x20mm ölçüsündeki bir numune yapılmış ve oluşan model eklemeli imalat, FDM tekniğiyle ve PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Böylece verilen yükleme koşullarına uygun bir Femur kemiği oluşturulmuştur [34].



Şekil 1.21 Femur kemiği GD Uygulaması [34]

Son olarak incelediğimiz çalışmada, Stefan Junk et al. yarış arabasının arka aksının A kolunu fiber bazlı malzeme ve Siemens Nx ile oluşturulan GD parçasını eklemeli imalat yöntemiyle üreterek hafiflik ve parça üretim fiyatında iyileştirme yapmıştır [35].



Şekil 1.22 Yarış Arabası A Kolunun Gd ile tasarımı [35]

Literatürdeki GD çalışmaları Tablo 1.2'deki tasnif edilmiştir. Tablo incelendiğinde GD yazılımı olarak Autodesk Fusion360 çoğunlukla kullanıldığı görülmektedir. Çalışma alanı olarak havacılıktan endüstriyel tasarıma kadar birçok alanda uygulama yapılmıştır. Buradan da görüleceği üzere yakın gelecekte tasarımcıların vazgeçilmez araçlarından biri haline gelecektir.

Tablo 1.2. Literatürde GD Çalışmaları ve İçerikleri

Sıra No	Alan	Çalışma	Yöntem	Malzeme	Software
17	Protez	Protez Ayak	Eİ,FDM	ABS	Autodesk Fushion360
18	Endüstriyel Tasarım	Bisiklet Gidonu	Kısıtlamasız	Aluminyum	Autodesk Fushion360
19	Havacılık	İniş Takımı	3 axis Cnc	Aluminyum	Autodesk Fushion360
20	Otomotiv	Biyel Kolu	3 axis Cnc	Steel 4340	Solid Edge
21	Havacılık	Dron Şasesi	Eİ,FDM	ABS	Autodesk Fushion360
22	Otomotiv	Fren Pedalı	3 axis Cnc	Aluminyum	Solid Edge
23	Robotik	Delta Robot Kolu	Eİ,FDM	ABS	Altair Inspire
24	Endüstriyel Tasarım	Laptop Masası	Eİ,FDM	PA	Autodesk Fushion360
25	Endüstriyel Tasarım	Kitap Tutucu	Eİ,FDM	ABS	Solid Edge
26	Robotik	Tutucu	Eİ,FDM	CF+PA	Altair Inspire
27	Robotik	Robot Manupulator	-	-	Autodesk Fushion360
28	Enerji	Rüzgar Türbin Rulman Yatağı	3 axis Cnc	Aluminyum	Autodesk Fushion360
29	Robotik	Robot Manupulator	Eİ,SS	316 L powder	Solidworks
30	Robotik	Robot Gövde Parçaları	Eİ,FDM	ABS	Autodesk Fushion360
32	Robotik	Tutucu	3 axis Cnc	ASTM 36	Autodesk Fushion360
33	Otomotiv	Kapı Menteşesi	Basınçlı Döküm	-	-
34	Biyomekanik	Femur Kemiği	Eİ,FDM	ABS	Autodesk Fushion360
35	Otomotiv	A Kolu	Eİ,FDM	Polymer/fibers	Siemens Nx

2. MALZEME VE METHODLAR

2.1 Giriş

Çalışmamızın ilk aşamasında eklemeli imalat methodlarından FDM yönteminin proses parametrelerinin optimizasyonu yapılacaktır. Daha sonrasında yine eklemeli imalat yöntemi olan SLS methoduyla karşılaştırma yapılacaktır.

Eklemeli imalat genel anlamda katman şeklinde malzemenin biriktirilmesi ile 3 boyutlu parçaların üretilmesi yöntemi olarak açıklayabiliriz. Tasarlanan parçalar, gerekli dosya biçimine dönüşüm yapılarak, dilimleyici programlar vasıtasıyla imalat dosyası yapılarak üretilir. Eİ avantajları şu şekilde sıralanabilmektedir.

- Karmaşık parçaların üretilmesi,
- Üretim maliyetlerinin düşük olması
- Kişiyeye özel üretimin yapılabilmesi
- Konvansiyonel yöntemlere göre parça sayısının düşürülmesi
- Daha az malzeme sarfiyatı
- Küçük boyuttaki parçaların özel üretim yapılmasına uygun olmasıdır.

Diğer taraftan eklemeli imalatın dezavantaj oluşturan taraflarını da şu şekilde sıralayabiliriz.

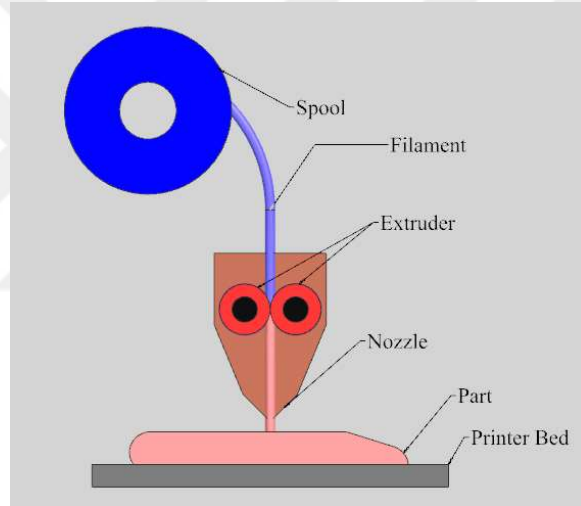
- Üretim hızlarının düşük olması
- İmalat sonrası yüzey pürüzlülüğünün, iç boşlukların olması
- Üretimde kullanılan malzeme çeşitliliğinin sınırlı olmasıdır.

2.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri, fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, toz zeminde füzyon ve malzeme püskürtme başlıkları altında toplanabilir. Yaptığımız çalışmada kullandığımız yöntemler FDM ve SLS yöntemi olması sebebiyle daha çok bu kısımlara odaklanacağız. FDM yöntemi malzeme ekstrüzyonu kategorisi içinde, SLS yöntemi de toz zeminde füzyon kategorisindedir.

2.2.1 Eriyik Yığıma Yöntemi (FDM)

Çalışmamızın ilk aşamasında FDM yöntemi için karakterizasyon yapılacaktır. FDM yöntemi kısaca termoplastik filamentlerin ittirilip, belirli sıcaklıktaki nozulda eritilerek katman katman aşağıdan yukarıya doğru biriktirilerek modellerin üretilmesidir. En çok kullanılan filament malzemeleri PLA (Poliaktirk Asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), TPU, PETG, PVA, Nylon şeklinde sıralanabilir. Bu filamentler istenen kalitelerde, mukavemet ve termal dayanımda olabilmektedir. Prosesin başlaması bir dizi işlemler yapmak gerekmektedir. Öncelikli ürünün 3D geometrisi oluşturulması ile başlar, daha sonra yazılımlarla işlem için takım yolu oluşturulur. Oluşan G kodları yazıcılara aktarılır. Yazıcıya istenen filament/ler takılır, böylece üretime hazır hale gelir ve üretim yapılır.



Şekil 2.1 FDM Sematik Görünümü

Literatürü inceldiğimizde FDM yöntemli 3D yazıcılar imal edilen çeşitli alanlarda parçalar vardır. Örnek olarak Thanh Hai Tuan Tran et al. çalışmasında bir delta robotunun kol tasarımında, GD yöntemiyle robotun kolunda %48.8 hafifletme optimizasyonu yapmıştır. Optimizasyonu yapılan parça imalata uygunluğu sebebiyle, ABS plastik filament ve FDM yöntemiyle 3D baskı yapılmıştır [23].



Şekil 2.2 Eİ İle Üretilen Delta Robot Kolu [23].

Diğer bir çalışmada I. A. Galfarsoro et al., çalışmasında bir robotun buzdolabı kapı contasının sökebilmesi için yeni bir iki parmaklı kavrayıcı konsepti geliştirmiştir. Yapılan ağırlık optimizasyonu ile %50 daha hafif bir parmak tasarımı yapılmıştır. İmal edebilirlik gereği, malzeme karbon fiber takviyeli oniks poliamid filament seçilmiş ve FDM yöntemli katmanlı imalat yöntemi tercih edilmiştir [24].



Şekil 2.3 Eİ İle Üretilen Robot Parmağı [24].

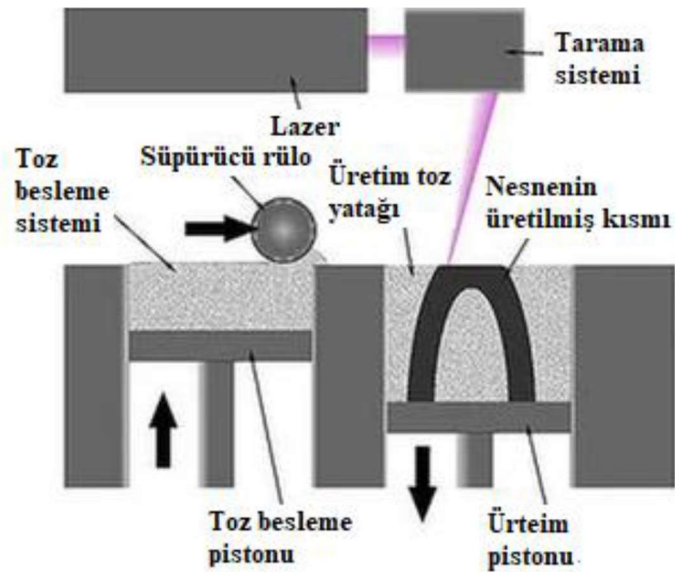
Otomotiv alanında ise Stefan Junk et al. bir otomobil A kolu parçasını fiber bazlı filament ve Siemens Nx ile oluşturulan üretken tasarım parçasını eklemeli imalat yöntemiyle üreterek hafiflik sağlamış ve parça üretim fiyatında iyileştirme yapmıştır [35].



Şekil 2.4 Eİ ile Üretilen Otomobil A Kolu Parçası[35]

2.2.2 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Çalışmamızda kullanılan diğer yöntemde SLS yöntemidir. Yöntem, lazer kullanılarak metal, metal olmayan tozların ya da seramik malzemelerin seçici olarak sinterlenmesiyle oluşan eklemeli üretim sürecidir. Yazıcı tozu hammaddenin erime noktasına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Lazer yapılacak olan modelin bir kesitini tarar ve bu aşamada parçacıkları mekanik olarak biraraya getirmektedir. Herhangi kaynama yapmayan toz baskı esnasında parçayı destekler böylece özel destekli yapılara ihtiyaç duyulmaz.



Şekil 2.5 Seçici Lazer Sinterleme Mekanizması [37]

Bu yöntemde özellikle poliamid (PA) bazlı tozlar, iyi mekanik parça özellikleriyle ve olumlu sinterleme davranışları nedeniyle kullanılmaktadır. PA12, PA11 ve PA6 'nın yanı sıra polistiren (PS), polipropilen (PP), polietilen (PE), termoplastik poliüretan (TPU) ve polieter eter kullanılmaktadır.

Literatür incelendiğinde SLS yöntemi kullanılarak yapılan birçok çalışma görülmektedir. Örneğin havacılık alanında Adriano Nicola Pilagatti et al., yaptığı çalışmada bir direksiyon parçasında generative design metoduyla mevcut tasarıma göre %52 hafifletmeyle alternatif bir parça oluşturmuştur. Elde edilen parçanın karmaşık yapısı ve imal edilebilirlik gereği eklemeli imalat yönteminden SLS ile imal etmiştir ve malzeme olarak AlSi10Mg metal alaşımı kullanılmıştır [38].



Şekil 2.6 Gd ve SLS yöntemiyle üretilen direksiyon parçası [38]

2.3.1 Ultimaker S5 3D İle Uygulama

Çalıştığımız laboratuvarımızda Utimaker S5 3D yazıcı bulunmaktadır. Mevcutlar yazıcılar arasında en yaygın olan yazıcılardan biridir.

Yazıcı iki farklı filamentle baskı yapabilmektedir. Yazıcı, PLA ve ABS gibi filamentleri sorunsuz bir şekilde basmaktadır. Destek malzemesi olarak kullanılan suda çözünen PVA filamentini de yazmaktadır.

Yazının baskı alanı 230 x 190 mm'lik çıkarılabilir camdır. Bunun altında ısıtmalı bir yatak mevcuttur. Z yönünde 200 mmlık hareket söz konusudur.

Ultimaker S5, eklentiler sayesinde SolidWorks, Siemens NX ve Autodesk Inventor gibi CAD / CAM yazılımları ile doğrudan entegre çalışabilir. Yazıcının tüm özellikleri Tablo 3.1'te görülmektedir ve Şekil 2.7'de yazıcıyı görmekteyiz.

Yazıcı hem Ultimaker kendi markası hem başka marka filamentler ile çalışmaktadır.

Tablo 2.1 Ultimaker S5 Yazıcının teknik özellikleri

Baskı Hacmi:	230 x 190 x 200 mm
Katman Yüksekliği:	20 mikron
Ekstrüder Besleme Sistemi:	Bowden, Uzaktan Besleme
Ekstrüder Tipi:	Çift Ekstrüder, Elektronik Kaldırılabilir Sistem
Nozzle Çapı:	0,4 mm
Maksimum Baskı Hızı: > 24 mm ³ /s	> 24 mm ³ /s
Maksimum Ekstrüder Sıcaklığı:	280°C
Maksimum Isıtılabilir Yatak Sıcaklığı:	140°C
Kapalı Baskı Alanı:	Hayır, yarı kapalı
Otomatik Yatak Kalibrasyonu:	Evet
Bağlantı:	WiFi, LAN, USB Kartı
İzleme İçin Dahili Kamera:	Evet
Ortalama Çalışma Gürültüsü:	< 50 dB
Filament Çapı:	2,85 mm
Farklı Marka Filament Kullanımı:	Evet
Filament Çeşitleri:	PLA, ABS, Naylon, CPE, PC, PP, TPU, PVA
Dosya Türleri:	STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, webp, PNG, G, G-Code, UFP

Ultimaker S5, rakiplerine göre oldukça ince bir katman yüksekliği olan 20 mikronluk bir katman çözünürlüğüne sahiptir. Yazıcı ailesinin en iyi minimum katman yüksekliği 0,06 mm - 60 mikrondur.



Şekil 2.7 Ultimaker S5 3D Printer

2.3.2 EOS P 396 Yazıcı İle Uygulama

Çalışmamızda kullanılan ikinci method, Eİ için SLS yöntemidir. Türetilen parçalar piyasada yapılmış ve EOS P 396 yazıcısı kullanılmıştır. EOS P 396 orta ölçekli hacimde bir yazıcıdır. Yazıcının özellikleri toplam üretim boyutları 340 x 340 x 600 mm'dır. Katman kalınlığı 100 mikrondur.



Şekil 2.8 EOS P 396 SLS Yazıcı

Saatte 3 L' e kadar hacimde baskı yapabilmektedir ve 70 W'lık bir lazer gücü vardır. (Şekil 2.8) Yazıcının teknik ve performans verileri Tablo2.2 'deki gibidir.

Tablo 2.2 EOS P 396 Teknik Veriler [39]

Technical Data EOS P 396	
Building volume	340 x 340 x 600 mm
Laser type	CO2 ; 70 W
Building rate	up to 3,0 l/h*
Layer thickness (depending on material)	0.06 – 0.10 – 0.12 – 0.15 – 0.18 mm
Scan speed during build process	up to 6 m/s (19.7 ft/s)
Power supply	400 V / 32 A, max. power supply 16 A
Power consumption	typical 2.1 kW; maximum 10 kW
Software	EOS ParameterEditor, EOSAME, EOS RP Tools, EOSTATE Everywhere, PSW 3.8, EOSYSTEM
Materials	PA 1101, PA 2200, PA 2201, PA 2210 FR, PA 3200 GF, Alumide, CarbonMide, PrimePart ST (PEBA 2301), PP 1101, PrimeCast 101, ALM FR-106, ALM HP 11-30, ALM PA 640 GSL

2.4 3D Baskı Malzemelerinin, Proseslerinin ve Yazıcıların Karşılaştırılması

İki yöntem ele alındığında, FDM yöntemi için en yaygın 3D baskı malzemeleri ABS, PLA ve bunlarla ilgili çeşitli karışımlardır. Gelişmiş FDM yazıcıları, yüksek ısı direnci, darbe direnci, kimyasal direnç ve sağlamlık gibi özellikler sunan diğer özel malzemelerle de baskı yapabilir.

Tablo 2.3 Yazıcının Teknik Özelliklerini Karşılaştırılması

	Ultimaker S5	EOS P 396
Printing Technology	FDM	SLS
Slicing Software	Cura 5.3.0	EOS Parameter Editor
Build envelope W x D x H [mm]	230 x 190 x 200 mm	340 x 340 x 600 mm
Materials	PLA, ABS, Naylon, CPE, PC, PP, TPU, PVA	PA 1101, PA 2200, PA 2201, PA 2210 FR, PrimePart PLUS (PA 2221), PrimePart FR (PA 2241 FR), PA 3200 GF, Alumide
Layer thickness (mm)	0.02	0.1

SLS yöntemi için malzeme seçimi, FDM'e kıyasla sınırlıdır, ancak mevcut malzemeler, enjeksiyonla kalıplanmış parçalara benzeyen mukavemet ile mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Seçici lazer sinterleme için en yaygın malzeme, mühendislik termoplastiği olan naylondur. Naylon hafif, güçlü ve esnek olmasının yanı sıra darbeye, kimyasallara, ısıya, UV ışığına, suya ve kire karşı dayanıklıdır.

Ham haldeki toz, baskı işlemi sırasında parçayı desteklediğinden, özel destek yapılarına ihtiyaç yoktur. Bu durum SLS yöntemini iç özellikler, ince duvarlar ve negatif özellikler dahil olmak üzere karmaşık geometriler için ideal hale getirmektedir.

SLS parçaları da genellikle FDM parçalarından daha izotropiktir. SLS parçaları, toz parçacıkları nedeniyle hafif pürüzlü bir yüzeye sahiptir fakat neredeyse görünür katman çizgisi yoktur.

3D baskı malzemeleri ve prosesleri, farklı uygulamalar için güçlü ve zayıf yönlerine sahiptir. Aşağıdaki tabloda proseslerin güçlü ve zayıf yanlarının bir özeti Tablo 2.4'te sunulmaktadır.

Tablo 2.4 Proseslerin Karşılaştırılması [40]

	FDM	SLS
Artıları	<ul style="list-style-type: none">• Düşük maliyetli tüketici makineleri ve malzemeleri	<ul style="list-style-type: none">• Güçlü fonksiyonel parçalar• Tasarım özgürlüğü• Destek yapılarına gerek yok
Eksileri	<ul style="list-style-type: none">• Düşük doğruluk• Düşük ayrıntılar• Sınırlı tasarım uyumluluğu• Doğruluk ve yüksek performanslı malzemelere ihtiyaç varsa, yüksek maliyetli yazıcılar	<ul style="list-style-type: none">• Daha pahalı donanım• Sınırlı malzeme seçenekleri
Uygulamalar	<ul style="list-style-type: none">• Düşük maliyetli hızlı prototipleme• Temel kavram kanıtı modelleri• Üst düzey endüstriyel makineler ve malzemelerle, son kullanım parçalar	<ul style="list-style-type: none">• Fonksiyonel prototipleme• Kısa tiraj, köprü veya özel üretim
Malzemeler	<ul style="list-style-type: none">• ABS, PLA gibi standart termoplastikler, tüketici seviyesindeki makineleri için çeşitli karışımları.• Yüksek maliyetli endüstriyel makinelerde yüksek performanslı kompozitler	<ul style="list-style-type: none">• Mühendislik termoplastikleri.• Naylon 11, Naylon 12 ve bunların kompozitleri,• TPU gibi termoplastik elastomerler.

2.5 Karakterizasyon

Çalışmamızın sistemağı gereğı bu aşamasında %15 Karbon Fiber Destekli Polyamid (CF15 + PA) malzeme için karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Farklı üretim parametrelerinde üretilen numuneler çekme testine tabi tutulmuş.

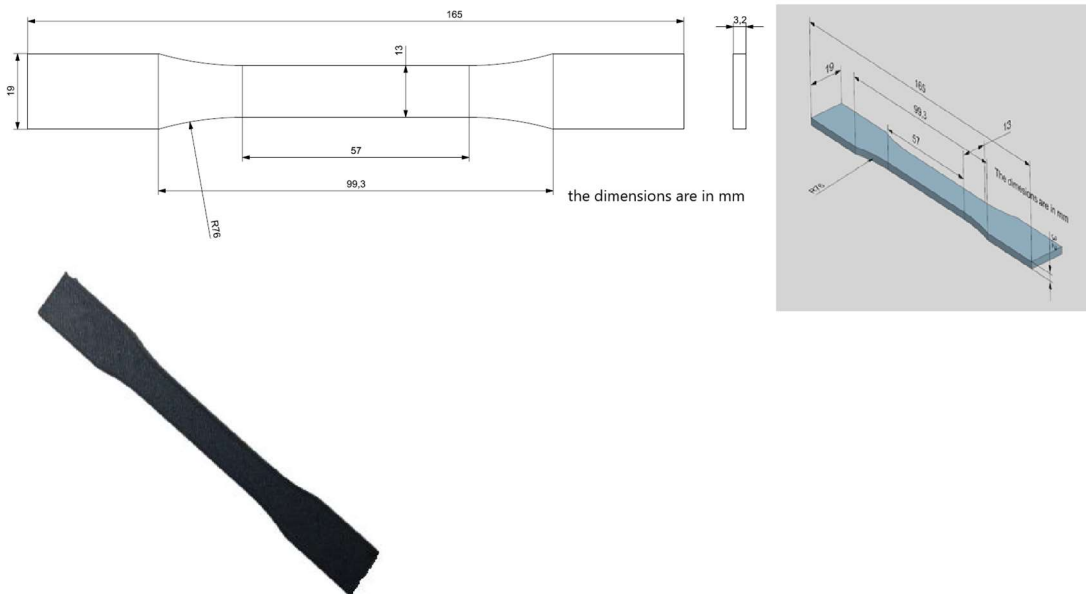
Çalışmada uygulamaları araştırma sistemiğı uygulanmıştır. Robot tutucu malzemesi olarak ağırlıkça %15 karbon fiber parçacık takviyeli Nylon6 kullanılmıştır. Malzemeler BASF firmasına ait filamentlerdir. Kullanılan filamentin Ektrüzyon öncesi çapı 2.85mm ve ekstrüzyon için ise 0.6mm nozül çapı kullanılmıştır. Filament sertleştirilmiş nozullu bir FDM yazıcıda çalışır. Çalışmada kullanılan karbon fiber filamentlerin diğ er filamentleri göre artıları şu şekilde sıralanabilmektedir; hafiflik, çok iyi boyutsal kararlılık, artan güç ve sertliktir. Kullanılan malzemelere ait üretici firma tarafından sağlanan mekanik özellikler Tablo 2.5’de sunulmuştur.

Tablo 2.5 Kullanılan malzemeye ait mekanik özellikler [36]

Properties	Unit	PA + CF15		
		XY	XZ	ZX
Density	g/cm ³	1.232		
Young's Modulus	MPa	8386	-	3532
Elongation at Break		1.80%	-	0.50%
Flextural Strength	MPa	160.7	-	50.8
Tensile Strength	MPa	103.2	-	18.2
Impact Strength Charpy (Notched)	kJ/m ²	4.8	-	1.3

Literatür araştırıldığında karbon fiber içerikli filamentlerle üretilen parçaların, zorlu ortam koşullarındaki karmaşık parçalar, robotik, otomotiv ve havacılıkta orta yükler altındaki parçalar için ideal bir malzeme olabileceği görülmüştür (Tablo 1.1).

Yapılan çalışmada Ultimaker S5 FDM 3D yazıcı kullanılmıştır. Numune baskısı cam tabla üzerinde yapılmış ve özel yapıştırıcı kullanılmıştır. Üretilen çekme testi numuneleri ASTM D683-14 Type I standardına göre 3D tasarımı yapılmış, .STL formatında kaydedilmiş ve orijinal ölçülerinde üretim planı oluşturulmuştur. Tasarlanan ve üretilen numuneye ait görüntüler Şekil 2.9'de verilmiştir. Üretim planı Ultimaker Cura 5.3.0 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Dilimleme sonrası 3D yazıcıya G kodları aktarılmış ve üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.9 Üretilen Standart Numunelere Ait Şekil Ve Ölçüleri

Çalışmada deneye tasarımı Taguchi methodu kullanılmıştır. Taguchi metodu deney tasarımı yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Oluşturulan dizi, performansı etkileyen tüm parametrelerin belirlenmesinde en aza indirilmiş gerekli deney sayısını içerir [6].

Metodun ilk aşaması Taguchi metodu için faktör analizidir. Faktör analizi kapsamında üretim parametreleri listelenmiş, literatürde yapılan çalışmalar, uzman değerlendirmesi ve üretim maliyeti gibi kısıtlar göz önüne alınarak en önemli parametreler deneysel tasarım için belirlenmiştir. Sırasıyla nozül çapı, tabla sıcaklığı ve infill tipi 0.6mm, 100°C ve ‘eş merkezli’ olmak üzere sabit olarak belirlenmiştir. Seçilen parametrelerin seviye değerleri üretici firmanın katalog verilerinden ve literatür araştırmalarından elde edilmiştir. Isıl işlem için 80 °C sıcaklık ortamında belirli süre ile ürünler tutularak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen parametreler Tablo 2.6’de verilmiştir.

Tablo 2.6 Seçilen deney parametreleri ve seviyeleri.

Symbol	Parameters	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Nozzle Temperature	°C	240	260	280
B	Print Speed	mm/s	30	55	80
C	Heat Treatment Time	min	0	20	40

Tablo 2.6’de verilen parametreler ve level sayıları dikkate alındığı zaman istatistiksel deney tasarım metodunda full faktöriyel deney için $3^3=27$ deney yapılması gerekmektedir. Fakat gerek test işlemlerinin zorluğu ve gerekse üretim maliyetinin fazla olması, daha düşük sayıda deneysel bir tasarım ile optimal parametrelerin bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Taguchi deney tasarım metodunda 3 faktörlü ve 3 seviyeli bir çalışma için L9 deneyi önerilmektedir. Seçilen L9 deney tasarım tablosu ile 8 etki ve etkileşim hesaplanabilmektedir. Bunlardan 3 tanesi A, B ve C olmak üzere ana etki, kalan 4 tane ise etkileşim ve eşadlarından oluşmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen çekme mukavemeti değeri ana yanıt değişkeni olarak kabul edilmiştir. Seçilen deney tablosu olan L9 Orthogonal Array Tablo 2.7’de verilmiştir.

Metodun ana etkisi her bir faktör için Sinyal / Gürültü = S/N oranının hesaplanmasıdır. Çalışmada temel amaç mukavemet değerini arttırmak olduğu için en büyük ‘En Büyük En İyidir’ yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemle göre her bir deneyin S/N oranı Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerde sinyal oranının büyük olması, gürültü oranının düşük olması istenmektedir. Burada gürültü oranı kontrol edilemeyen

değişkenleri, örneğin tezgâh titreşimi, akış oranı, homojen olmayan malzeme bölgeleri, hız düzensizliği gibi, kapsamaktadır. Uygulanan metodun sonucunda elde edilen veriler grafize edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 2.7 Seçilen L9 Orthogonal Array Eşleşmesi

No	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

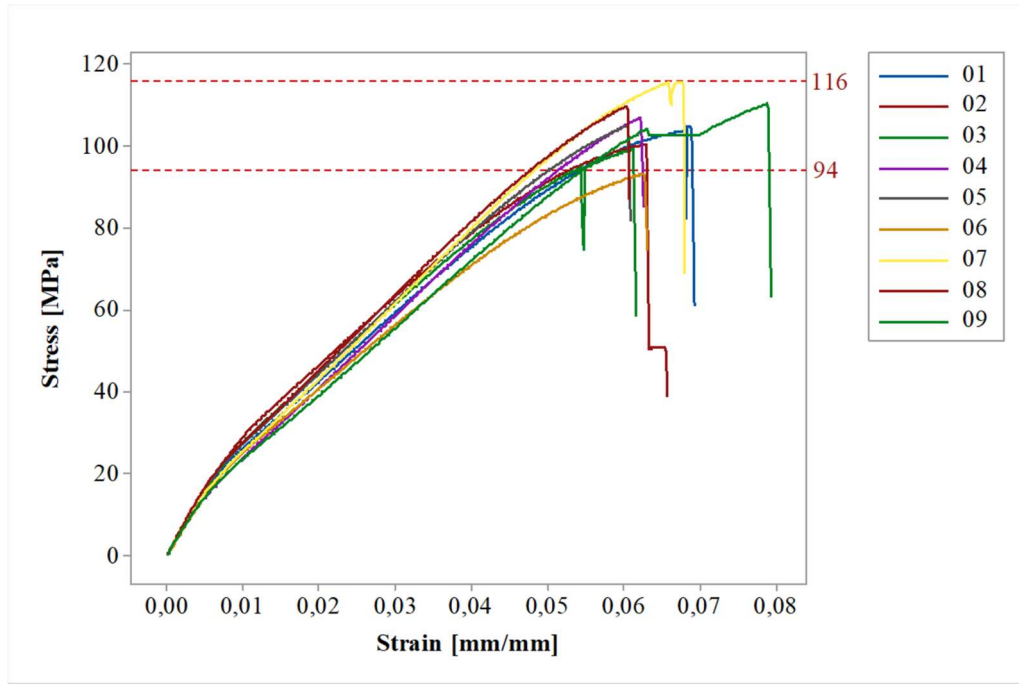
$$S/N_L = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (1)$$

Çalışma kapsamında üretilen her bir numune numaralandırılmış ve ayrı olarak paketlenmiştir. Sonrasında her bir numunenin ağırlığı hassas terazi ile ölçülmüş ve detaylandırılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu

Ağırlık eklemeli imalat işleminde performans açısından önemli bir parametredir. Çalışma sonucunda üretilen geometri aynı olmasına rağmen farklı ağırlıklar elde edilmiştir. Elde edilen ağırlık ortalaması Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil incelendiği zaman baskı sonrası ölçülen en büyük ağırlık 9.88 g ile 7. Deney şartında olduğu, bu deneyin 280 °C nozül sıcaklığında, 30 mm/s yazdırma hızında ve 40 dakikalık ısıtma süresinde meydana geldiği görülmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere yüksek nozül sıcaklığının numune ağırlığını arttırdığı, bu durumda erimiş malzemenin daha fazla yayıldığı ve porozite oranını düşürdüğü ön görülmüştür. Numune hacmi 8.39 cm^3 olduğu dikkate alındığı zaman beklenen teorik yoğunluğa göre numune ağırlığının 10.34 gr olacağı hesaplanmıştır. Beklenen ağırlık değerine göre en büyük hata miktarının 3. deneyde meydana geldiği, en düşük hatanın ise 7. Deneyde meydana geldiği ve %4.49 olduğu görülmektedir. Tablo 3.1’de numunelerin elde edilen ağırlıkları, beklenen ağırlıktan farkları ve etki değerleri verilmiştir. Deney parametrelerinin etkileşim grafiği ise Şekil 3.10-13 verilmiştir.



Şekil 3.1. Numunelerin Çekme Testi Grafikleri

Ağırlık oranları üzerine ‘En Büyük En İyidir’ yaklaşımı ile Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Her bir deney parametresinin S/N oranı hesaplanmış ve Şekil 3.10-13’de verilmiştir. Şekil incelendiği zaman her bir grafiğin önemli oranda değiştiği ve bu durum seçilen parametrelerin ve seviyelerinin ağırlık üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sırasıyla incelendiği zaman en etkili parametrenin A3, B1 ve C1 olduğu görülmektedir. Yine çalışma kapsamında gerçekleştirilen ANOVA hesaplamalarında her bir faktörün P-Değeri ve % etkisi hesaplanmıştır. İdeal şartlarda 0.05 değerinden küçük olan P değerleri için %95 üstü anlamlılığa sahiptir denilmektedir. A ve B parametrelerinin değeri 0.05 değerinden küçük olmasına rağmen C parametresi olan ısıtma süresinin 0.058 olduğu ve %94,2 anlamlılık seviyesinde olduğu görülmüştür. Yine ANOVA sonucunda A parametresinin etkisinin 50,25%, B’nin etkisinin 40,52% ve C’nin etkisinin %8,69 olduğu hesaplanmıştır. Deneysel hatanın ise %0.54 değerinde olduğu görülmüştür. Oluşturulan regresyon modeli ile R2 değerinin %93,46 olduğu ve bu değer deneysel çalışma için oluşturulan modelin tahmin performansının güçlü olacağını göstermektedir. Elde edilen optimal parametre L9 deney tasarımı tablosunda bulunmadığı ve full faktöriyel deney tasarımı tablosunu tahmin ettirilmiştir.

Tahmin sonucu ağırlık olarak beklenen ağırlığa en yakın deneyin A3B1C1 deneyinde (14. Deney) olduğu ve değerinin 9.99 g olduğu hesaplanmıştır. Bu değer beklenen yoğunluk değerinden sapma miktarının ise %3.38 olduğu belirlenmiştir. Tahmin sonucu elde edilen ağırlık değerleri Şekil 3.13’de verilmiştir.

Çalışmanın karakterizasyon kısmında ikinci adım olarak ürünlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen çekme testi işleminde elde edilen Gerilim-Gerilme grafikleri şekilde verilmiştir. Çekme testi cihazından elde edilen Young’s Modulus, Tensile Strength ve Elongation at Break değerleri hesaplanmış ve Şekil 3.6-9 de gösterilmiştir. Çekme testine tabi tutulan numunelerin çekme sonrası hasarlı halleri Şekil 3.2 de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere bütün numunelerde gevrek kırılma meydana gelmiştir. Kırılma hattını incelemek için 1 numaralı deneyin kırık ve normal yüzeyinden SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri farklı büyütme oranlarında elde edilmiş ve Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekil 3.4’de kırılan numunelerin kırılma hatları ve yönelimleri gösterilmiştir. SEM görüntülerinden görüldüğü üzere karbon fiberlerin ana matristen ayrılması, kopması ve ana matris malzemesi olan Nylon6’nın ayrılması sonucu hasarın

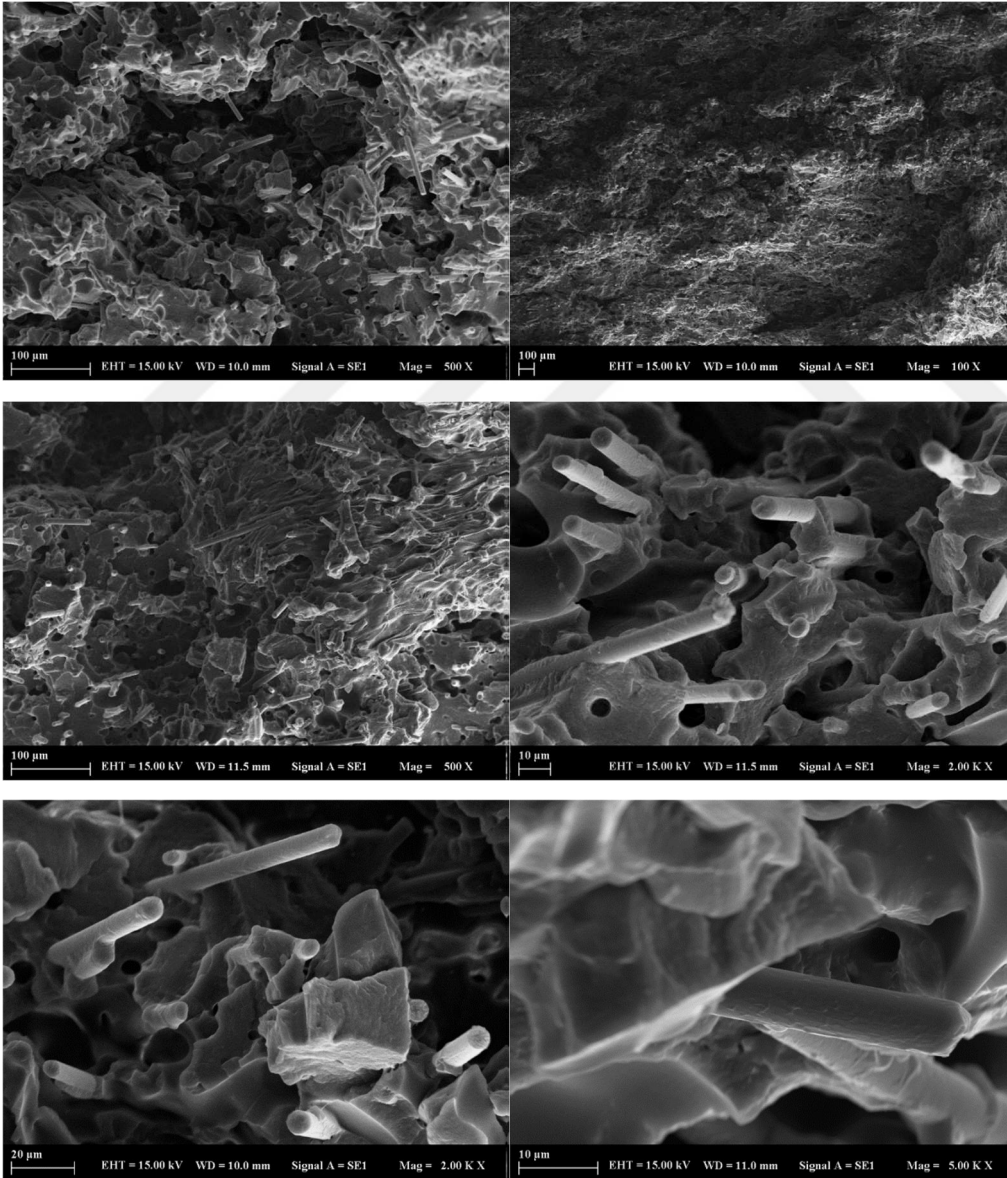
meydana geldiği görülmüştür. Normal şartlar altında Nylon6 malzemesinin çekme testi grafiği incelendiği zaman 40MPa civarı bir çekme mukavemetine sahip olurken ortalama %39 uzamaya sahip olduğu görülmektedir. %15 oranında sürekli olmayan karbon fiber ilavesinin yapıyı önemli oranda gevrekleştirdiği görülmektedir. Fakat karbon fiber ilavesinin çekme mukavemeti değerinde büyük bir artışa sebep olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.2. Çekme Testi Uygulanan Numunelerin Kırılma Davranışı

Şekil 3.6-9'dan görüldüğü üzere ağırlık çalışmasında da olduğu üzere gerek Young's Modulus ve gerekse Tensile Strength değerlerinde en büyük değeri 7. deney vermiştir. Bu nokta göstermiştir ki baskı performansı için önemli nokta olan ağırlık ile mekanik özellikler arasında güçlü bir ilişki vardır. Kırılma noktasındaki % uzamada ise en büyük değerin 1. Deneyde ortaya çıktığı, en küçük değerin ise 9. deneyde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada paralel değerlere sahip olan Tensile Strength değeri üzerinden optimizasyon yapılmıştır. İlk olarak Taguchi analizi 'En Büyük En İyidir' yaklaşımına göre gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda her bir deneyin S/N oranları hesaplanmış ve etki grafikleri çizdirilmiştir. Grafikler Şekil 3.10-12'da verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere Tensile Strength değeri açısından optimal üretim parametrelerinin A3B1C2 olduğu görülmüştür. Yine grafiklerden görüldüğü üzere A'nın en etkili parametre olduğu, sonrasında B'nin, en az etkili parametrenin ise C olduğu

görülmektedir. Yine Tensile Strength değeri için ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA çalışması sonuçları sonucuna göre deneyde bulunan hata değerinin %4.31 olduğu, yine en büyük etkinin %49,94 ile A parametresi, sonra %41,35 ile B parametresi olduğu ve en son %4,40 ile C parametresi olduğu görülmüştür. P değerleri açısından ise A parametresinin %92,1, B parametresinin %90,6, C parametresinin ise %50,6 anlamlılık düzeylerinde olduğu hesaplanmıştır. Ağırlık optimizasyonuna göre P değerlerinde düşme olsa da anlamlılık düzeyleri iki parametre için %90 üstü olduğu görülmektedir. Oluşturulan modelin R2 değerinin %95,69 olduğu ve değer modelin tahmin konusunda başarılı olacağını açıklamaktadır.

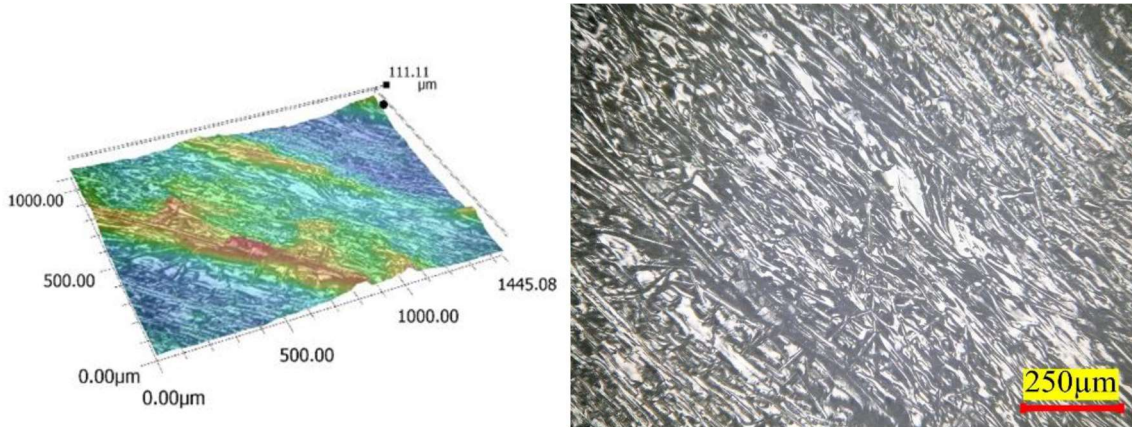


Şekil 3.3. SEM Fotoğrafları

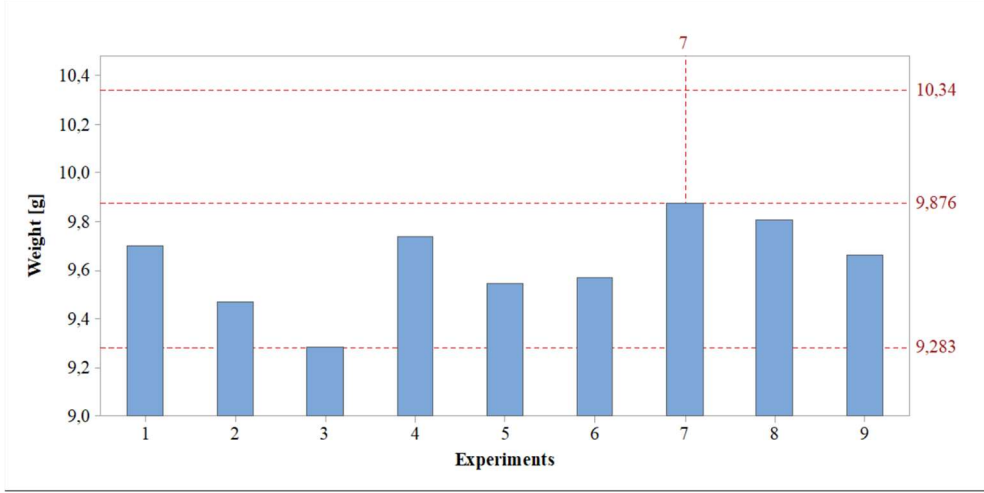
Çalışmada full faktöriyel deney tasarım tablosu yani 27 deney sonucu oluşturulan model üzerinden tahmin ettirilmiştir. Tahmin edilen Tensile Strength değerleri Şekil 3.14’de verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere en büyük değer A3B1C2 ve ikinci sırada A3B1C3 olduğu görülmüştür. A3B1 parametresinin sabit olduğu, 3. Sırada olan C yani ısıtma süresinin sonuç üzerinde çok etkisi olmadığı görülmüştür. Isıl işlem etkisinin belirlenen seviyelerde etkisi gözlenememiş ve ileride yapılacak çalışmalarda gerek ısıtma sıcaklığı ve gerekse ısıtma süresi farklı seviyelerde denenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak gerek ağırlık ve gerekse Tensile Strength açısından değerlendirildiği zaman A3B1C2 parametresinin üretim için seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu aşamada karakterizasyonunun son aşaması olarak kırılma mekaniği üzerine değerlendirme yapılacaktır.

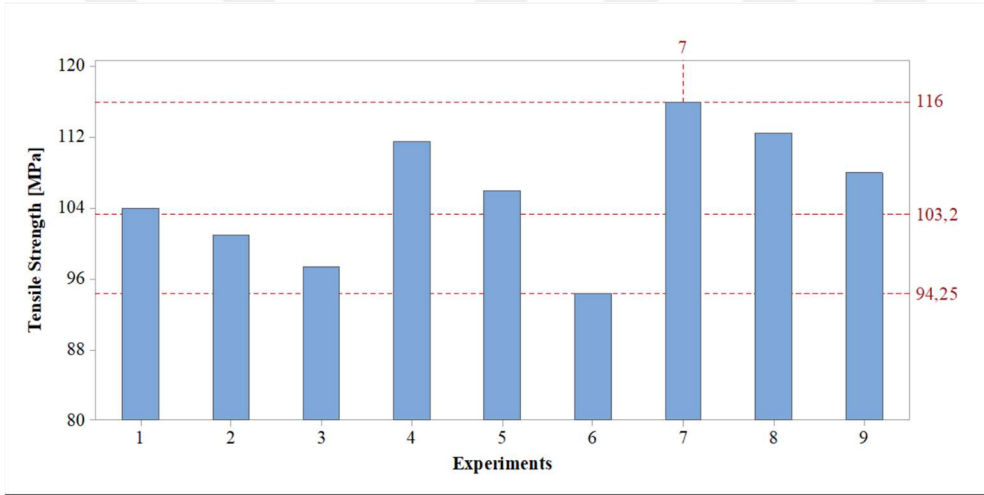
Çalışmada üretilen numunelerin yüzey durumları incelenmiştir. İncelemeler Keyence marka dijital optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin aynı bölgesinden ölçüm yapılmış ve kaydedilmiştir. İlk olarak katman izlerinin geçiş noktalarına yoğunlaşmış ve yüzey topografyası resimleri 3D olarak alınmıştır. Örneğin 1. parçanın 3d yüzey topografyası ve optik mikroskop yüzey görüntüsü verilmiştir. 9 deney için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri μm cinsinden Şekil 3.4 de verilmiştir.



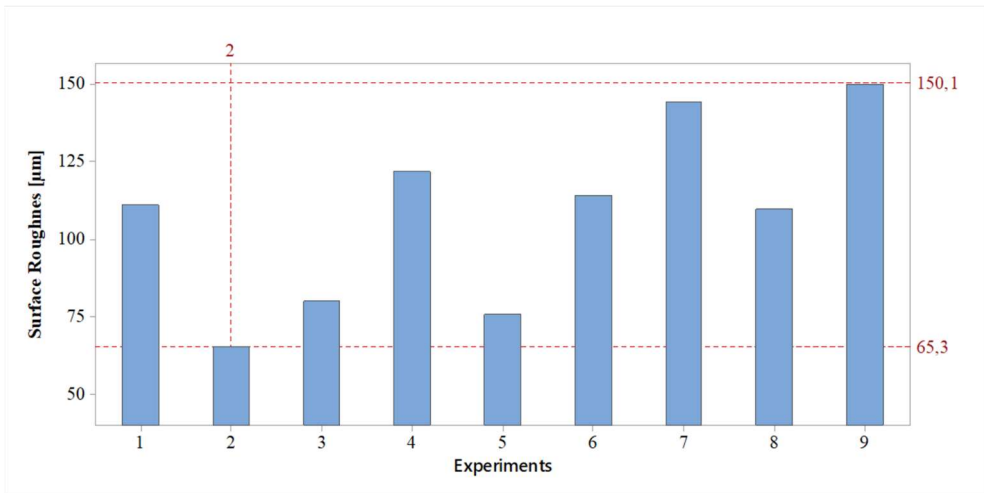
Şekil: 3.4. Deneye ait 3d yüzey topografyası ve Optik Görüntüsü



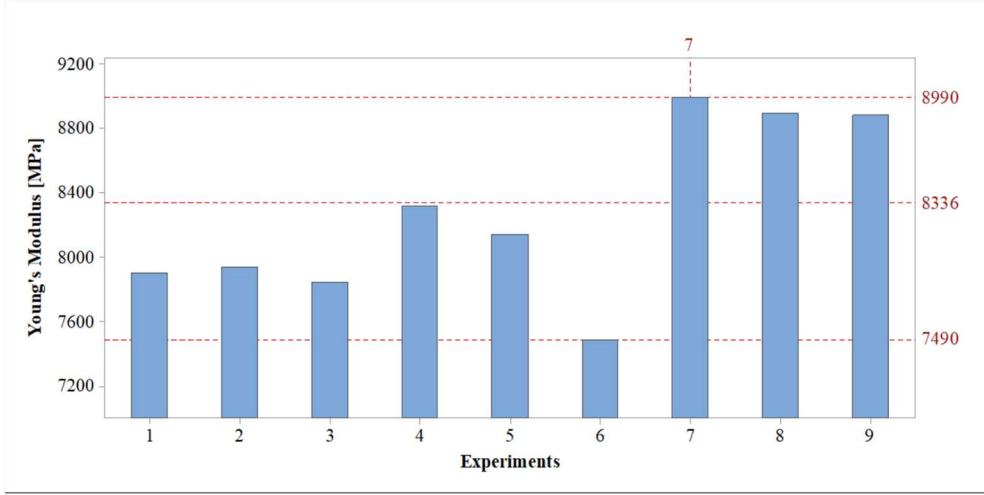
Şekil 3.5. Numunelerin Ağırlık Ortalaması



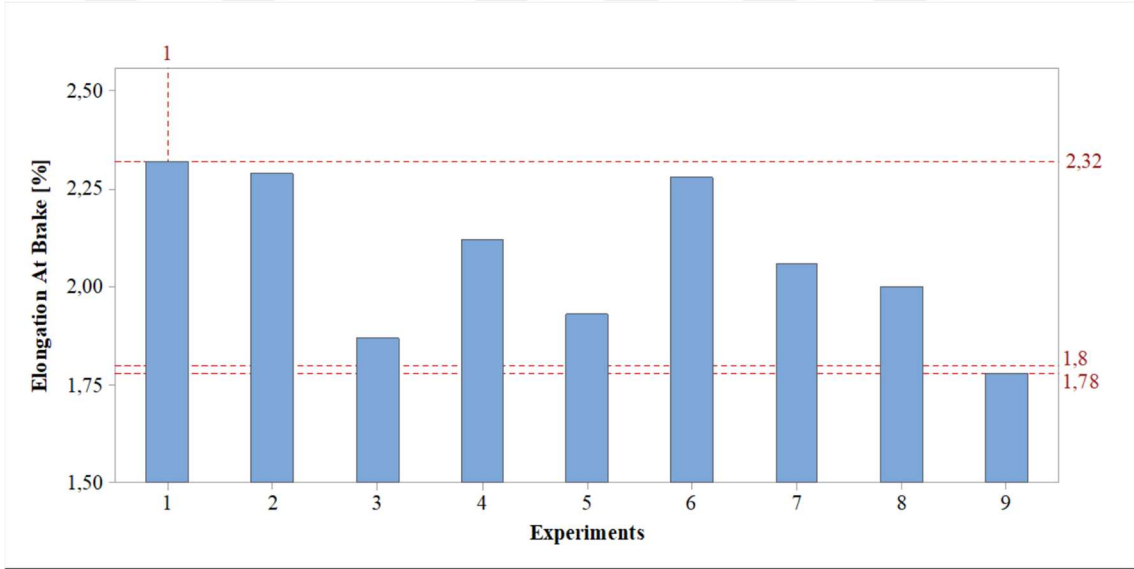
Şekil 3.6. Numunelerin Çekme Mukavemet Ortalaması



Şekil 3.7. Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Ortalaması

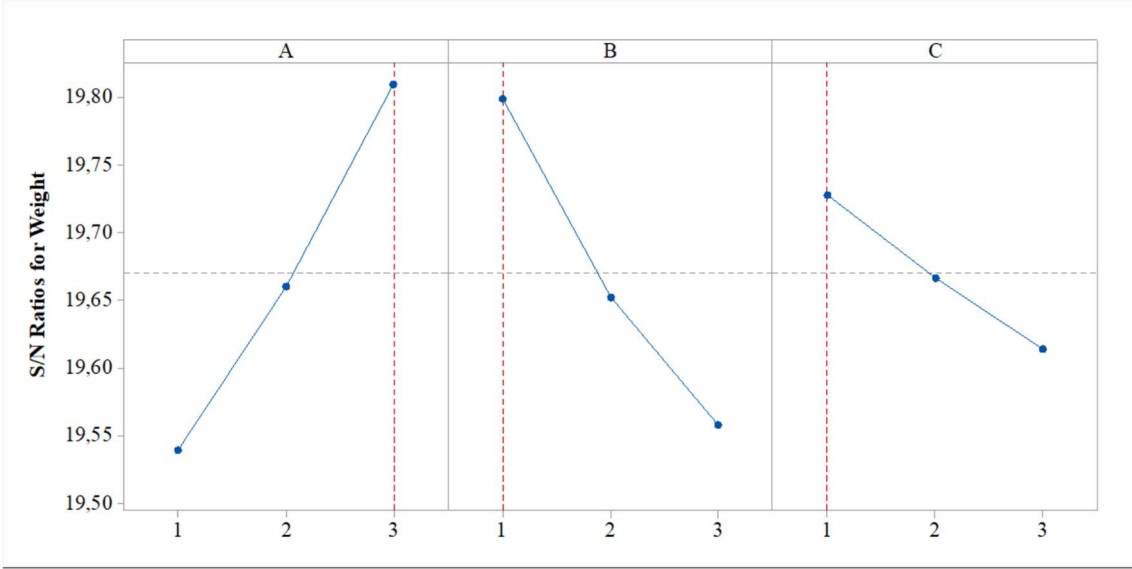


Şekil 3.8. Numunelerin Young Modül Ortalaması

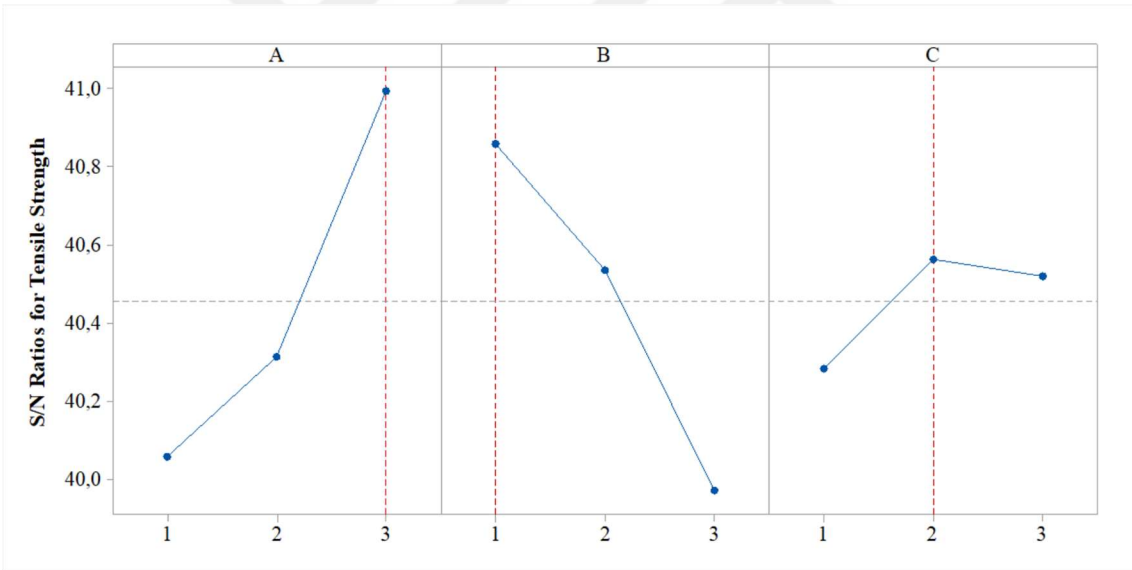


Şekil 3.9. Numunelerin Elongation at Brake Ortalaması

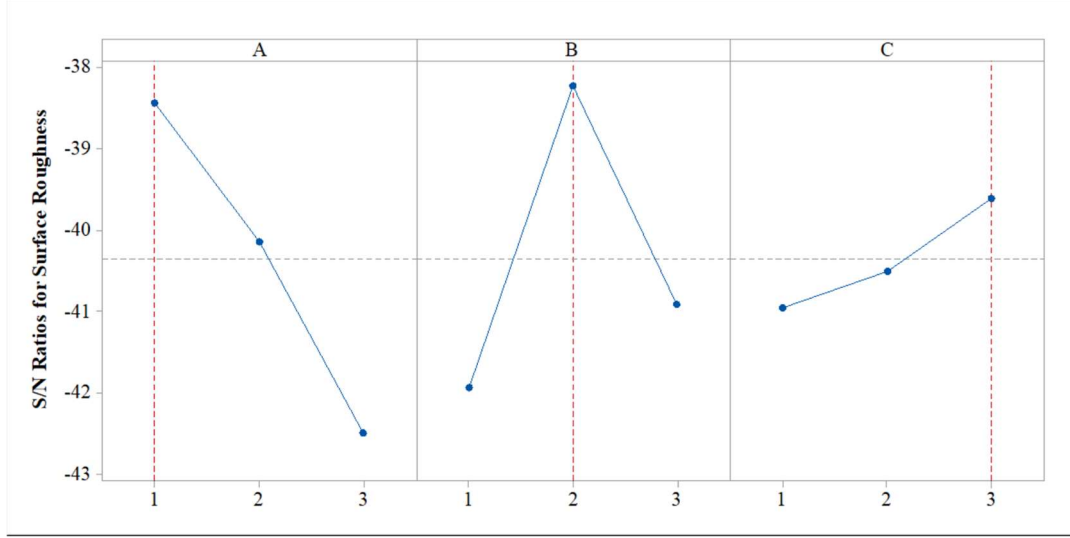
Şekil 3.7’de görüldüğü üzere maksimum yüzey pürüzlülük değeri 7. deneyde elde edilmiştir. Yani 280°C nozül sıcaklık değeri, baskı hızı 30 mm/s, ısıl işlem süresi ise 40 dakika parametre set değerlerinde maksimum yüzey pürüzlülüğü değerini vermiştir. Fakat en düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 2. Deney şartında sağlanmış ve 240 °C nozül sıcaklığında, 55 mm/s baskı hızında ve 20 dakika ısıl işlem süresinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.10. Numunelerin Ağırlık Değerlerine Göre S/N oranları

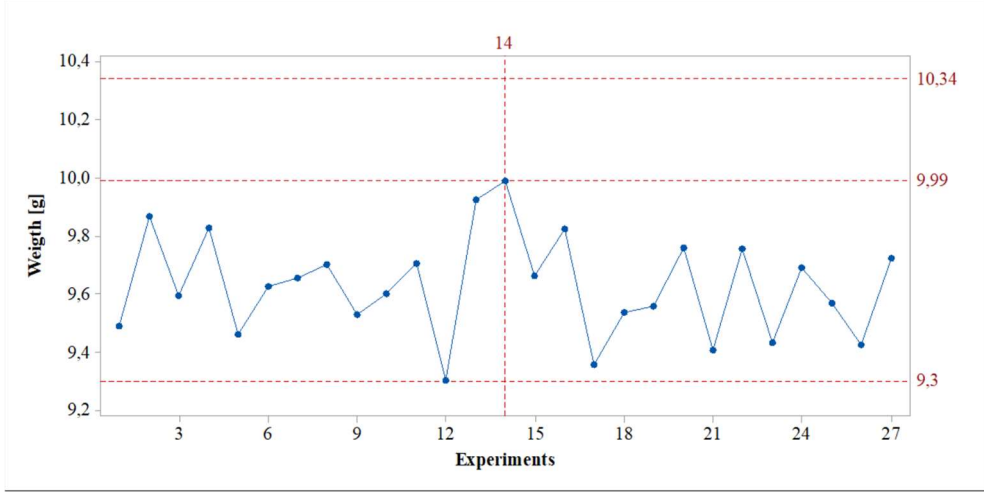


Şekil 3.11. Numunelerin Çekme Mukavemeti Değerlerine Göre S/N oranları

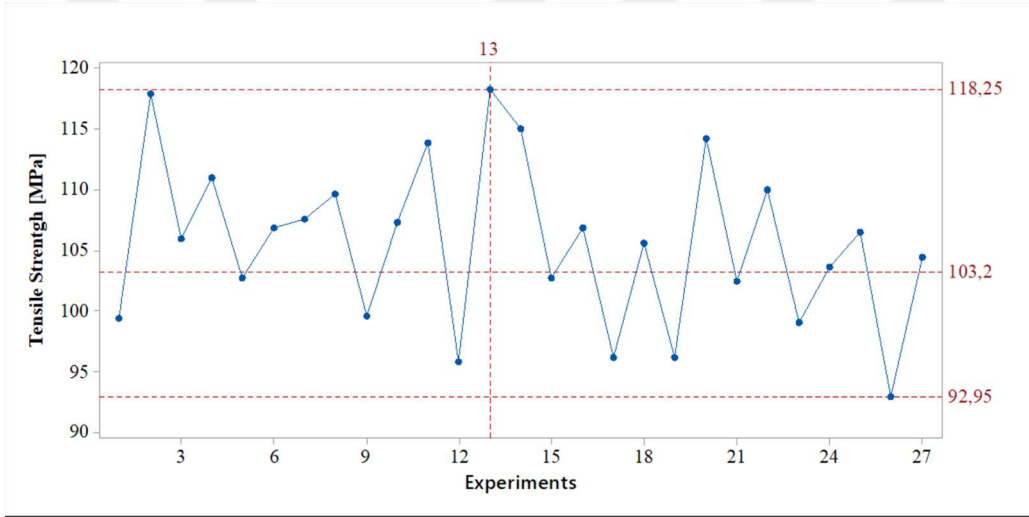


Şekil 3.12. Numunelerin Yüzey Pürüzlülük Değerlerine Göre S/N oranları

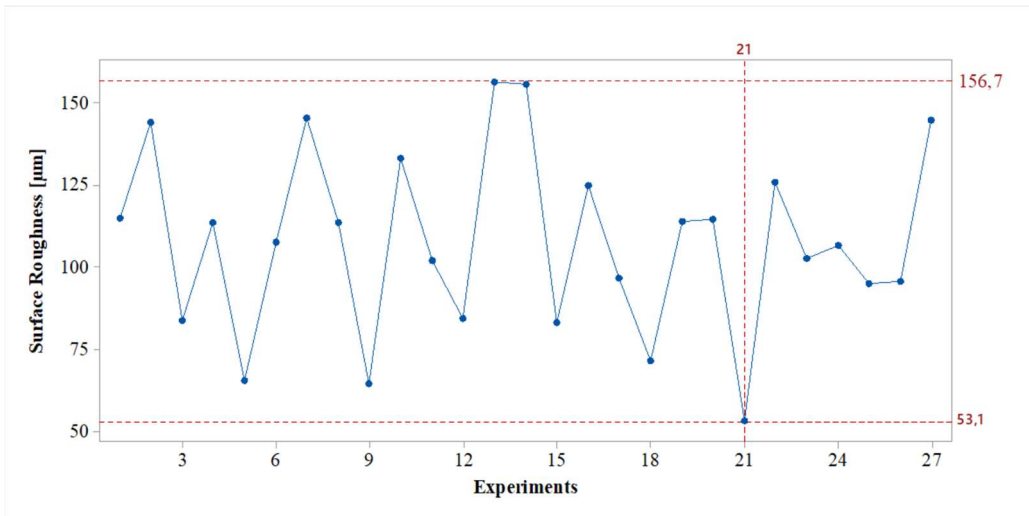
Tablodan ve değerlerden görüldüğü üzere ağırlık ve çekme mukavemeti değerinin aksine baskı hızı ve baskı sıcaklığının düşük değerleri daha iyi yüzey pürüzlülük değeri sağlamıştır. Yüzey pürüzlülüğü için her bir faktörün SN oranları hesaplanmış ve bu oranlardan etki grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 3.12 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, daha önceki sonuç değişkenlerinde olduğu gibi A parametresinin en etkili parametre olduğu, B parametresinin ikinci ve C parametresinin çok düşük etki ile 3. sırada etkili olduğu görülmektedir. Fakat daha önceki ağırlık ve çekme mukavemeti etki grafiklerinden farklı olarak B parametresinin ikinci seviyesinde maksimum SN oranını verirken, ağırlık ve çekme mukavemetinde birinci seviyede maksimum SN oranını vermekte idi. Bu durum baskı hızınının 55 mm/s için daha iyi yüzey pürüzlülük değeri vereceğini ifade etmektedir. Çalışmada elde edilen SN oranları dikkate alındığı zaman optimal parametrelerin A1B2C3 olduğu görülmektedir. Etki grafiğinden elde edilen sonuçlar sonrası ANOVA analizi tablosu oluşturulmuş ve bu tabloda görüldüğü üzere A ve B parametreleri için P değerinin 0.05 değerinden küçük olduğu ve yüksek anlamlılık düzeylerine sahip olduğu görülmüştür. Fakat C parametresinde, etki grafiklerinde olduğu gibi, 0.274 gibi büyük bir P değerine sahip olduğu ve bu durum düşük anlamlılık seviyesinde olduğunu göstermektedir. Etkilerin % olarak hesaplanması durumunda ise A parametresinin 53,1% etki ile birinci, B parametresinin %41,23 ile ikinci, C parametresinin ise 4,12% ile en düşük etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmada hatanın % etkisinin ise 1,55% olduğu görülmektedir. ANOVA sonuçları Tablo 3.1'da verilmiştir.



Şekil 3.13. Tahmin Edilen Ağırlık Değerleri



Şekil 3.14. Tahmin Edilen Çekme Mukavemeti Değerleri



Şekil 3.15. Tahmin Edilen Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri

Yapılan deneysel çalışmada 27 deney yapılması gerekirken, 1/3 kesirli deney uygulanmış ve L9 ortogonal dizisinde deney yapılmıştır. Gerçekleştirilen analiz ve optimizasyon çalışması sonrası matematiksel model kullanılarak 27 deney tahmin edilmiş ve Şekil 3.13-15’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en düşük 53,09 µm değerinde A1B2C3 optimal parametre seviyelerinde olduğu görülmüştür. Tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.15 ‘de verilmiştir.

Tablo 3.1. Ağırlık, Çekme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğü İçin Yapılan ANOVA Çalışması

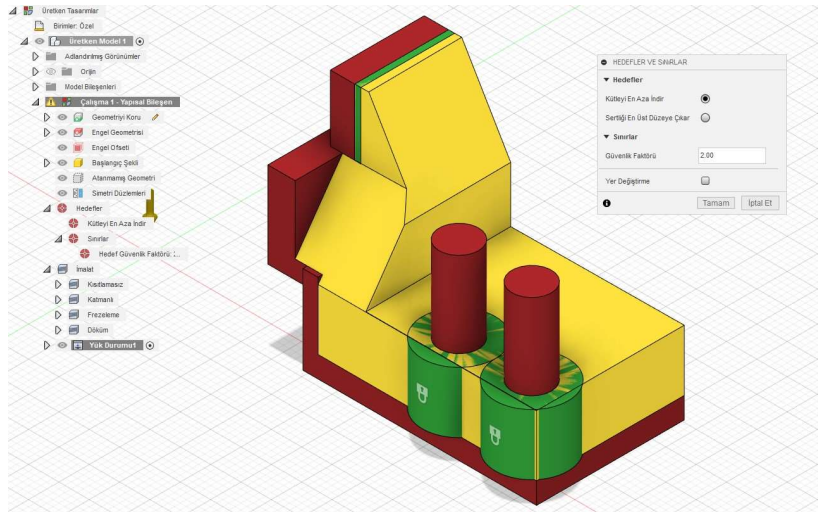
Weight	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Contribution
	A	2	0,1344	0,0672	93,06	0,011	50,25
	B	2	0,1083	0,0541	75,05	0,013	40,52
	C	2	0,0232	0,0116	16,10	0,058	8,69
	Error	2	0,0014	0,00072			0,54
	Total	8	0,2674				100
R2: 93,46%							
Tensile Strength	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Contribution
	A	2	209,41	104,73	11,59	0,079	49,94
	B	2	173,38	86,69	9,60	0,094	41,35
	C	2	18,48	9,24	1,02	0,494	4,40
	Error	2	18,06	9,03			4,31
	Total	8	419,34				100
R2: 95,69%							
Surface Roughness	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Contribution
	A	2	3697,7	1848,84	34,23	0,028	53,10
	B	2	2870,7	1435,36	26,57	0,036	41,23
	C	2	286,1	143,06	2,65	0,274	4,12
	Error	2	108,0	54,01			1,55
	Total	8	6962,5				100
R2: 98,45%							

4. GENERATIVE DESIGN

Çalışmamızın ikinci aşamasında geleneksel tasarımına alternatif olarak robot tutucu parmağı için GD çalışması yapılmıştır. Generative design bir araştırma sürecidir. Tasarımcılar tasarım koşullarını, sınırları; malzeme, üretim yöntemi ve maliyet kısıtlamaları gibi parametreleri yazılıma girer. GD yazılımı, bulut teknolojisinin gücünü kullanarak çözümün tüm olası sonuçları araştırarak tasarım alternatifleri sunar ve iterasyon yaparak optimal çözümleri sunar. Yöntemle bazılarını kendimizin dahi düşünemeyeceği yüksek performanslı tasarım alternatifleri oluşturabilir. Yöntemde tek bir çözüm yok, çok sayıda tasarım alternatifleri vardır. Nihai olarak üretken tasarım programına sınır, yükleme koşulları ve üretilebilirlik parametreleri girilen parçaların tasarım alternatif oluşturulur [18]. GD'nın avantajı güvenilir bir çözüme ulaşma süresinin kısa olması, geniş seçenek yelpazesi ve ayarlanabilirliktir [20].

4.1 Generative Design Yazılımının Seçilmesi

Çalışmamızda Autodesk Fusion 360 Fusion yazılımının üretken tasarım modulu kullanılmıştır. Literatüre bakıldığında programın kullanıldığı bir çok çalışma görülmektedir (Tablo 1.2). Yazılıma parçanın korunması gereken kısımları, engel geometrisi, parçanın mevcut hali, yükleme koşulları ve imalat yöntemi seçimleri yapılmaktadır. Sonrasında yazılım yapay zeka ve bulut teknolojisini kullanarak çoklu iterasyon ile tasarım alternatifleri kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil 4.1'de Autodesk Fusion 360 GD modülü görülmektedir.

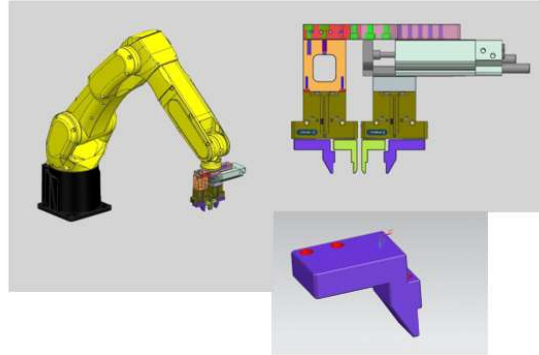
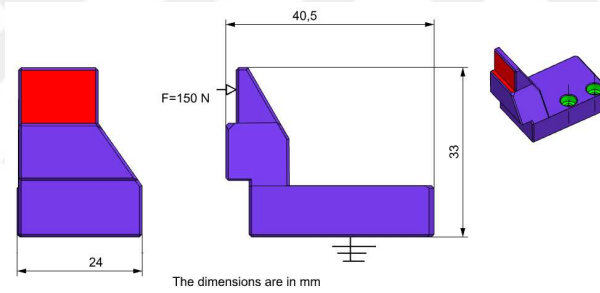


Şekil 4.1. Autodesk Fusion 360 GD Modülü

4.2 Robot Tutucu Parçası

Bu bölümde endüstriyel bir uygulama yapmak üzere endüstriyel robot gripper parçası üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Robot tutucu parmakları otomasyon sistemlerinde iş parçasına özgü tasarlanmakta ve üretilmektedir. Dolayısıyla işe özgü özelliği bulunmakta ve bu özelliğinden dolayı yüksek adetli üretim yerine daha çok düşük adetli üretimleri gerçekleştirilmektedir. Ürün klasik olarak 3d tasarım yöntemi ile ürünün modeli tasarlanıp sonrasında talaşlı imalat yöntemi ile üretilmekteydi. Fakat gelişen yeni nesil tasarım teknolojileri ile daha düşük maliyetli, daha az malzeme kullanılan ve tasarım yetenekleri sunan alternatif yaklaşımlar kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla yapılan bu çalışmada endüstriyel robotlar için gripper tasarımları Generative Design prensibine göre geliştirilmiştir.

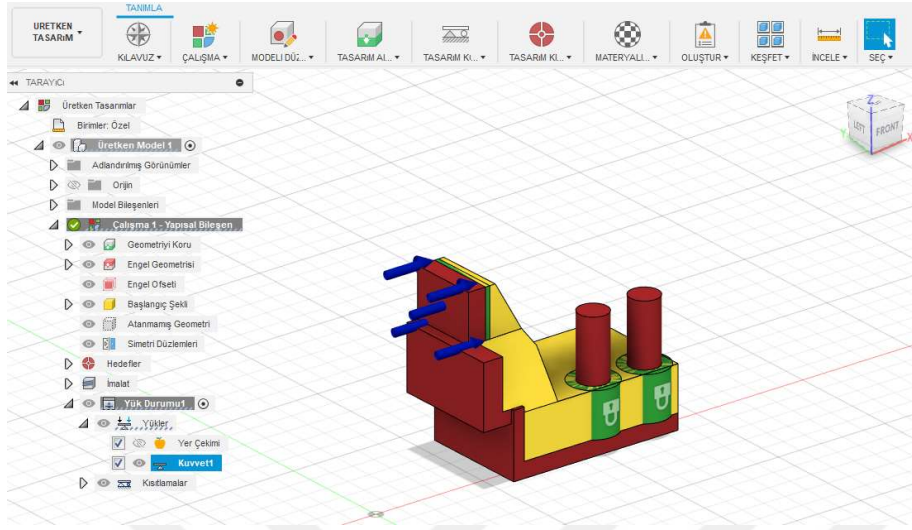
Mevcut tutucu modeli Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde de gösterildiği üzere mevcut ölçülerdeki bir ürünün yük taşıma kapasitesi 150N’tur.



Şekil 4.2 Çalışılan Endüstriyel Robot Tutucu Parmağı

Sonraki aşamada ise Generative Design çalışmasının ilk adımı olarak yapının kullanılan yerlerini belirlenir. Robot tutucu parmağının korunan geometrileri yeşil renkte, engel geometrisi kırmızı, başlangıç geometrisi sarı renkte, korunan geometriye uygulanı kuvvet

150 N'dur ve diğer yeşil parçalar sabit olarak Şekil 4.3'de tanımlanmıştır. Hedefler kısmında kütleyi en aza indir ve güvenlik faktörü olarak 2 seçilir.

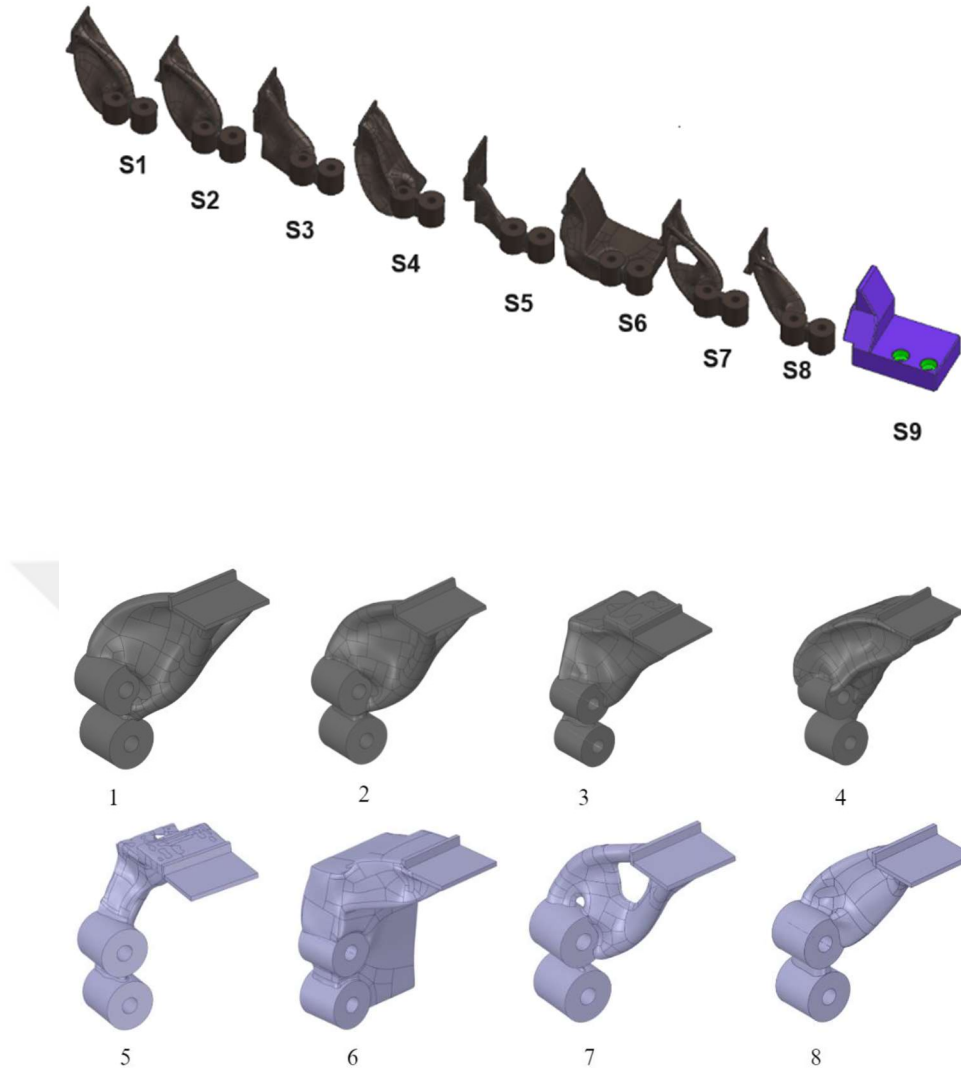


Şekil 4.3 GD Modülü ve Tutucunun Tanımlamaları

Üretim yöntemi olarak eklemeli imalat (Eİ) seçilmiş ve desteksiz üretim planlanmıştır. Malzeme kısmında çalışmamızın ilk kısmındaki optimize edilmiş PA+15CF malzemenin mekanik verileri girilir. Gerilme durumu için ise Formül 4.1'de verilen Von-Misses Gerilme kriteri kullanılmıştır. Yapılan tanımlamalardan sonra ön kontrol yapılır ve eksik olan tanımlamalar giderilir.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (4.1)$$

Bu aşamadan sonra program bulut teknoloji ve yapay zekanın gücüyle tasarım alternatiflerini oluşturur. Programda çalışmada elde edilen malzeme ve yazılımın önerdiği malzemelerle beraber 8 adet tasarım alternatif oluşturdu. Tasarımlar Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4 Üretilen Geometri Alternatifleri

5. TUTUCULARIN SLS VE FDM METHODUYLA ÜRETİMİ

5.1 Parçaların Üretimi

GD programından oluşturulan tasarımlar üretmek için katı modellere çevrilir. Katı modeller programın dışına aktarılır ve Siemens NX programıyla düzenlenerek üretime ve uygulamaya uygun hale getirilmiştir.

GD ile elde edilen geometriler ve ilk kullanılan model Ultimaker Cura yazılımı ile %15 karbon fiber takviyeli Nylon6 malzemesi üretimi planlanmıştır. Üretim planlamasında FDM yöntemi için çalışmanın ilk aşamasındaki optimal üretim parametreleri kullanılmıştır. Parçaların üretim fotoğrafları Şekil 5.1’de görülmektedir.

İkinci üretim methodu olarak SLS yöntemi ve polyamid tozu (PA 2200) planlanmıştır. Üretimde EOS P 396 yazıcısı kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin mekanik verileri Tablo 5.1’deki gibidir. Üretilen parçaların tamamı da Şekil 5.2’deki 3 set halinde üretilmiş ve tasnif edilmiştir.

Tablo 5.1 PA 2200 Tozu Mekanik Verileri [39]

General material properties			
Average grain size	ISO 13320-11	56	µm
	Laser diffraction	2.2	mil
Bulk density	EN ISO 60	0.45	g/cm ³
Density of laser-sintered part	EOS method	0.93	g/cm ³
Mechanical properties			
Tensile modulus	EN ISO 527	1700	Mpa
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
Elongation at break	EN ISO 528	22	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa



Şekil 5.1 Numuneler FDM Yöntemi ve PA+CF Filament İle Üretilirken



Şekil 5.2 SLS Yöntemi ve PA2200 Toz İle Basılan Parçalar

6. PARÇALARIN TEST EDİLMESİ

6.1 Parçaların Test Edilmesi

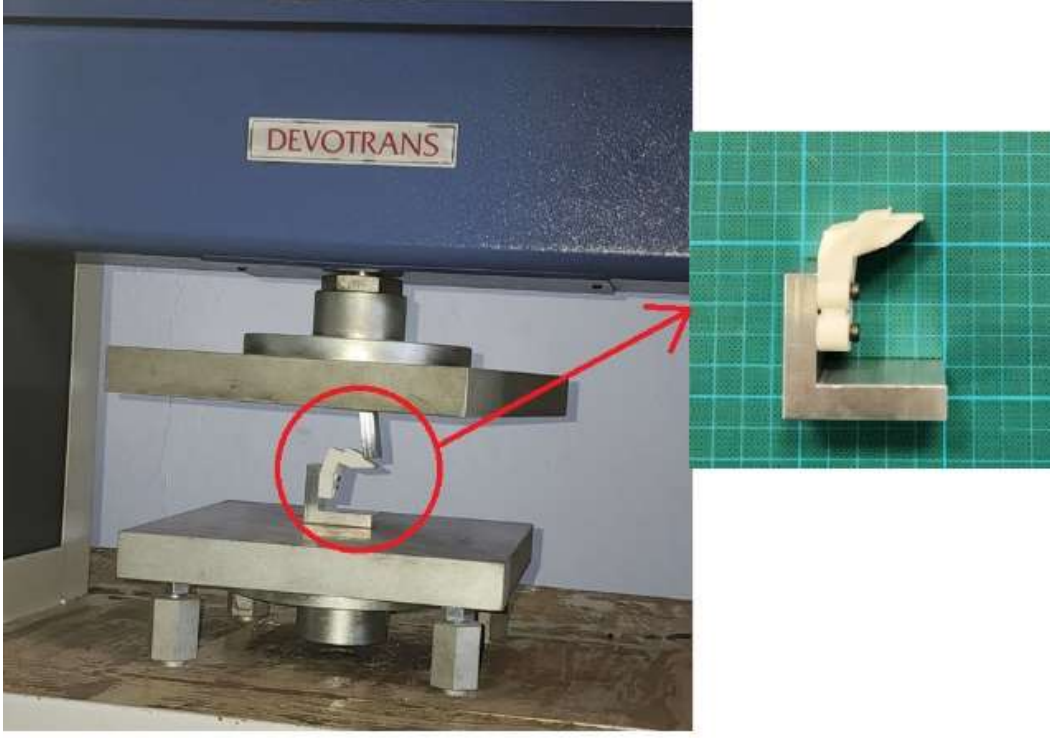
Üretilen numuneler basma deneyi için özel bir bağlama aparatı ile basma testi cihazında teste tabi tutulmuştur.

Basma deneyi statik test makinesinde yapılmıştır. Basma numunelerinin testleri için, Devotrans marka basma deneyi makinesi kullanılmıştır. Deneyin basma hızı 2 mm/dk'dır ve makine kapasitesi 50 KN'dur.

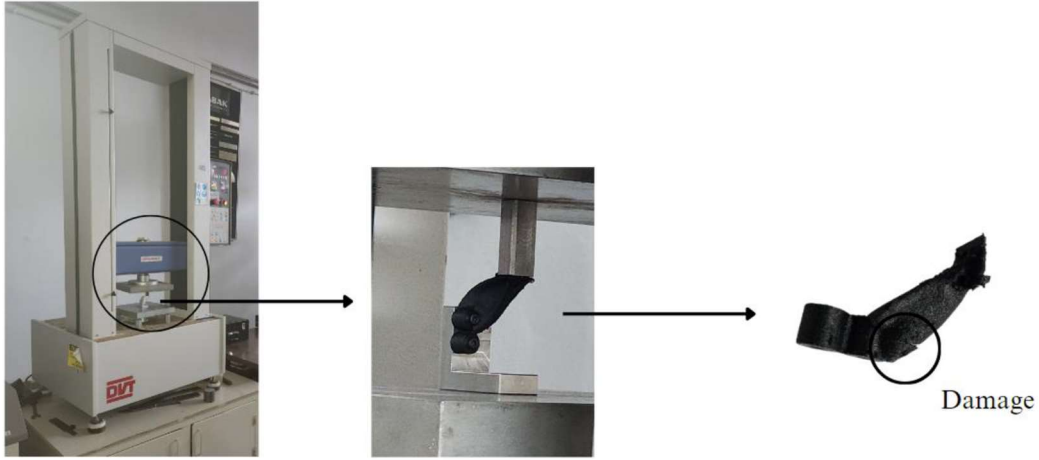
Tüm numuneler Şekil 6.1'deki sıralanmış ve tasnif edilmiştir. Bağlanan tüm parçalara 2 'ser numune olacak şekilde basma deneyi planlanmıştır. Deneyin yapılabilmesi için Şekil 6.2'deki test fikstürü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sonrasında bütün tutucular bu fikstüre bağlanarak test edilmiştir.



Şekil 6.1 FDM ve SLS ile üretilen Deney Numuneleri



Şekil 6.2. Tutucular İçin Basma Testi Düzeği ve Fiksturu



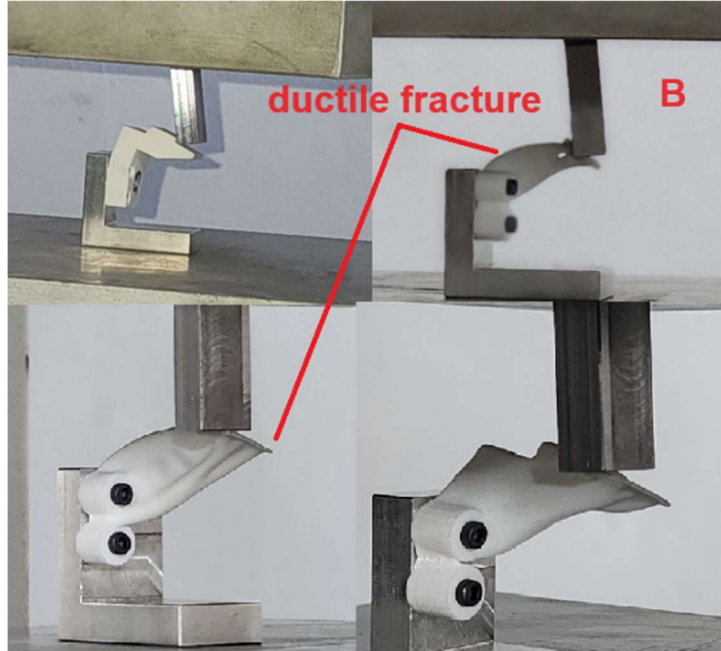
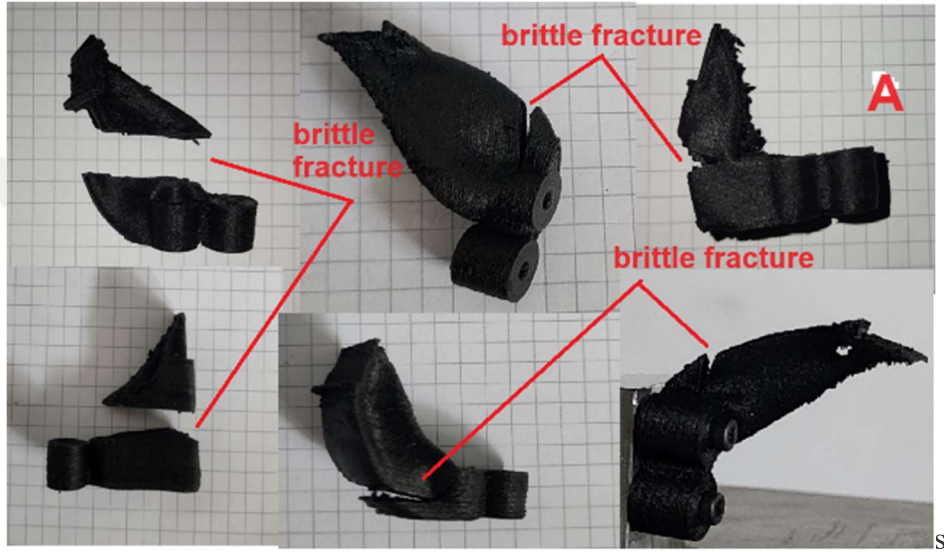
Şekil 6.3. Basma testi cihazında ürünlerin test edilmesi

Elde edilen görüntüler incelendiği zaman FDM yöntemiyle üretilen parçalarda çekme deneyinde olduğu gibi yine gevrek kırılma meydana geldiği yapılar da görülmüştür. SLS yönteminde üretilen parçaların görüntüleri incelediğinde polyamid malzeme davranışı gereği sünek davranış göstermiştir.

Kırılmalar incelendiğinde Fdm yönteminde basma yönü kritik öneme sahiptir. Yükleme

yönü basma yönüne paralel olduğunda gevrek kırılmalar meydana gelmiştir. SLS ile yapılan baskılar ise FDM metoduna göre daha homojen yapıda olduğu söylenebilir. SLS yönteminde PA2200 tozunda basılan parçalardan hiçbirinde kırılma görülmemiş ve sünek davranış göstermiştir (Şekil 6.4).

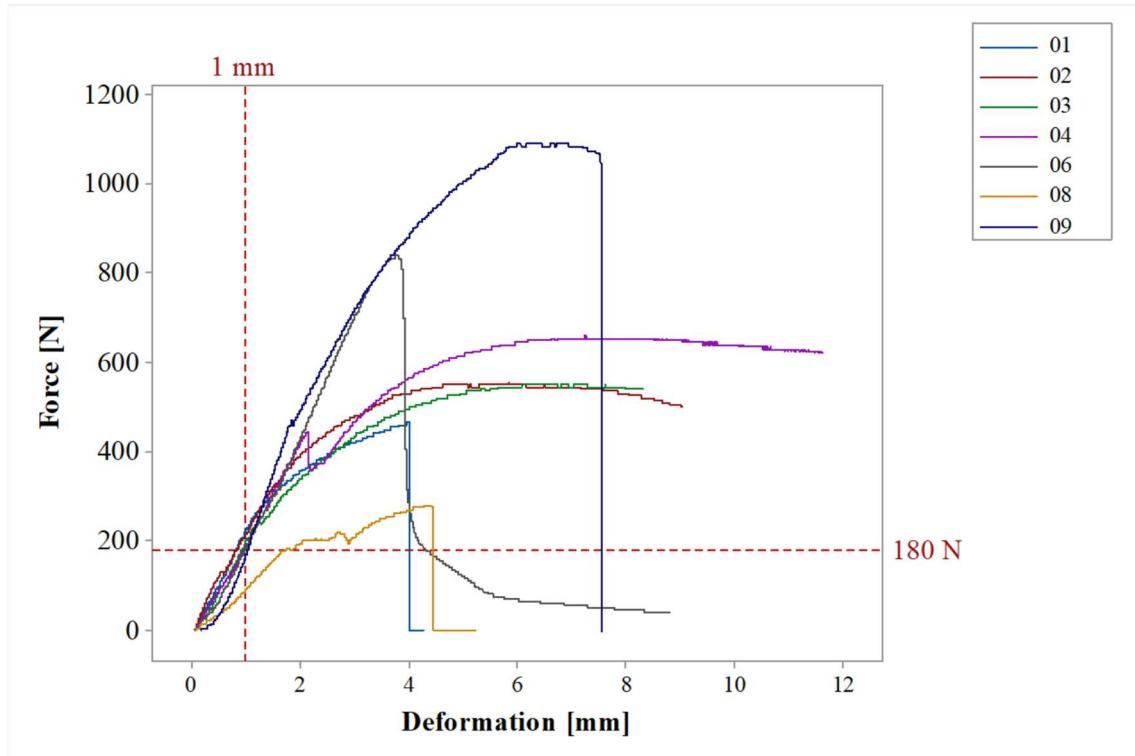
Test sonucu elde edilen yükleme yer değiştirme grafiği SLS ve FDM yöntemleri için ayrı ayrı aşağıda verilmiştir (Şekil 6.5 ve 6). Şekil üzerinde müsaade edilen 1mm sehim ve 1.2 emniyet katsayılı 180N yükleme durumu ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 6.4 A Gevrek kırılma ve B Sünek Kırılma

Tablo 6.1 1 mm Sehimde Kuvvet Taşıma Kapasitesi

	Kuvvet [N] (1mm Sehimde)	Design Method	Material
FDM			
S1	182,5	generative	PA+%15CF
S2	212,5	generative	PA+%15CF
S3	185	generative	PA+%15CF
S4	192,5	generative	PA+%15CF
S5	Cancel	generative	PA+%15CF
S6	225	generative	PA+%15CF
S7	Cancel	generative	PA+%15CF
S8	72,5	generative	PA+%15CF
S9	177,5	conventional	PA+%15CF
SLS			
S1	110	generative	PA2200
S2	152,5	generative	PA2200
S3	137,5	generative	PA2200
S4	185	generative	PA2200
S5	Cancel	generative	PA2200
S6	230	generative	PA2200
S7	112,5	generative	PA2200
S8	70	generative	PA2200
S9	150	conventional	PA2200

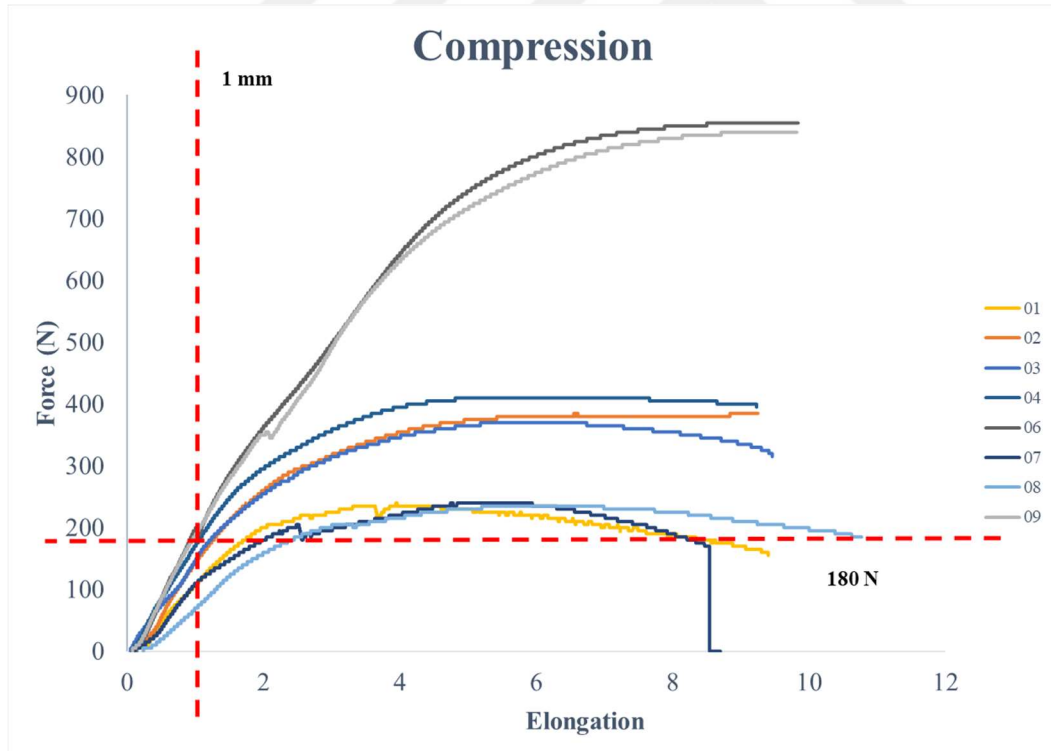


Şekil 6.5 FDM Numunelerin Basma Testi Grafikleri

Tablo 6.1’de görüldüğü üzere FDM yönteminde 8 numaralı ürünün tasarım kriterini sağlamadığı, diğer ürünlerin ise sağladığı görülmüştür. Fakat 9 numaralı parça, ful geometrik ölçüdeki, 1mm sehim için 177, 50N yük sağladığı, sınır değerde olduğu görülmüştür. Yine şekil incelendiği zaman 9 numaralı ürünün yüksek mukavemete sahip olduğu görülmektedir.

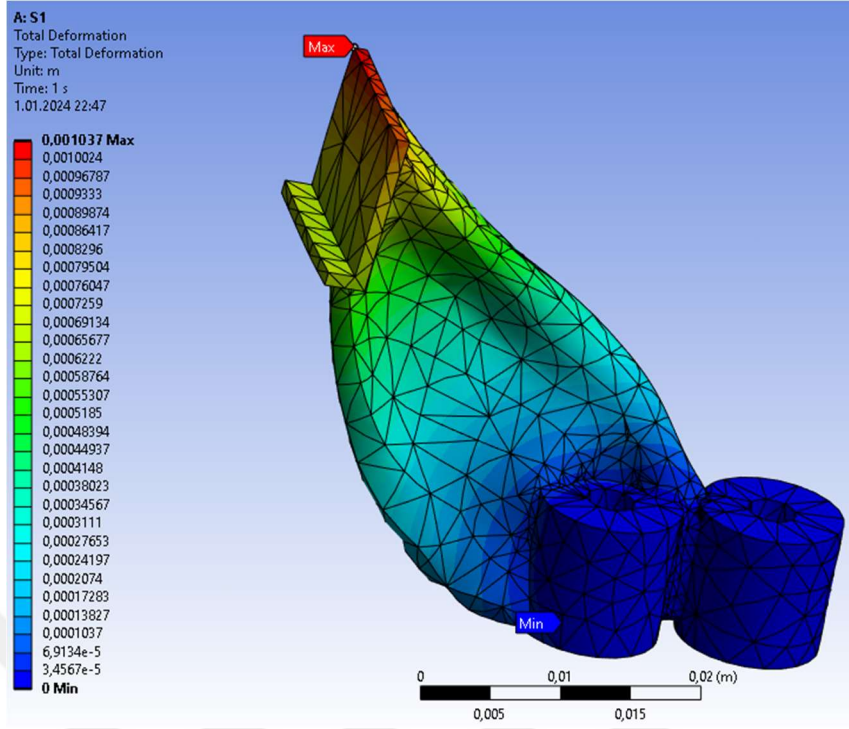
SLS yönteminde ise 1,2,3,7 ve 8 numaralı ürünlerin tasarım kriterini sağlamadığı, diğer ürünlerin ise sağladığı görülmüştür. Yine 9 numaralı parçanın istenen yükleme koşullarını, ful geometrik ölçüdeki, 1mm sehim için 150 N yük sağladığı, emniyet katsayısının 1 olacak şekilde kaldığı görülmüştür. Bu sebeple bu modelin seçilmesi bir durumda bir risk olacağı görülmüştür. Yine şekil incelendiği zaman 9 numaralı ürünün yüksek mukavemete sahip olduğu görülmektedir.

Ürünlerin ve orijinal ürünün kuvvet analizi yapıldığı zaman FDM yönteminde üretilen 1, 3 ve 4. Parçanın yük olarak uygun olacağı görülmektedir. SLS yöntemine bakıldığında 4. Parçanın uygun olduğu görülmektedir.

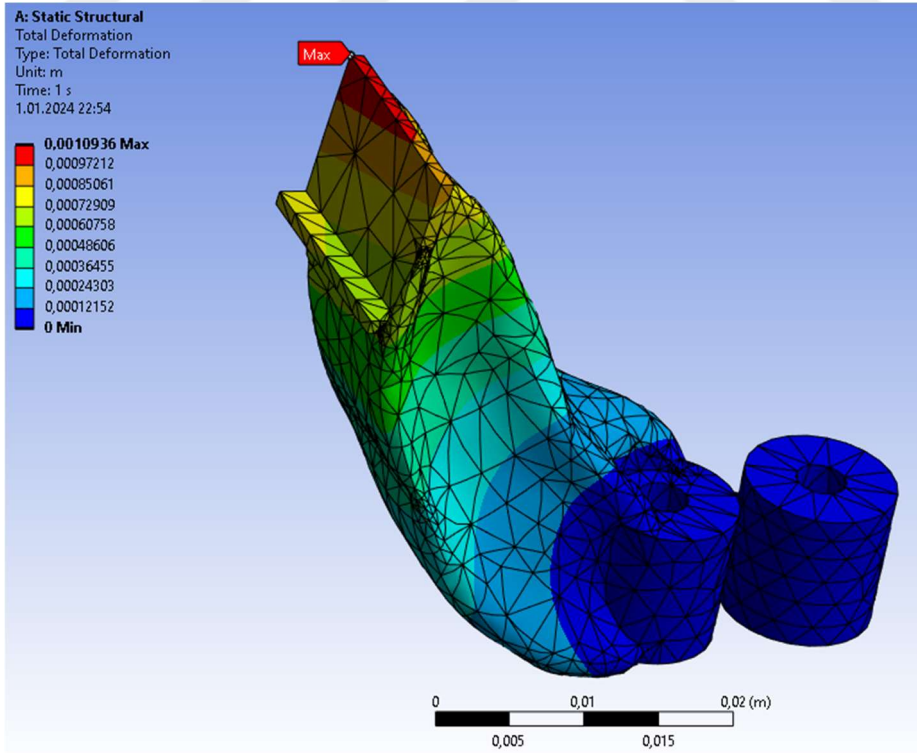


Şekil 6.6 SLS Numunelerin Basma Testi Grafikleri

Sonuçlar incelendiğinde FDM yöntemi için S1 ve SLS yöntemi içinde S4 parçasının optimal çözüm olacağı görülmüştür.



Şekil 6.7 FDM S1 Numunesinin 1 mm Şahimde Taşıyabileceği Kuvvetin FEA Analizi



Şekil 6.8 SLS S4 Numunesinin 1 mm Şahimde Taşıyabileceği Kuvvetin FEA Analizi

Seçilen S1 ve S4 numunesinin Ansys programıyla sonlu elemanlar analizi (FEA) yapılarak etkiyen 1 mm sehimdeki taşıyabileceği kuvvet kapasiteleri tespit edilerek, gerçekleşen basma deneyi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

Analiz sonuçlara göre FDM methodunun S1 numunesinin 1 mm sehimde 730 N yük taşıdığı görülmüştür. Bu değer test edilen taşıma kapasitenin yaklaşık 4 katı olmaktadır. Bu farklılık FDM yönteminin heterojen yapısı, baskı yönü ve baskı boşlukları gibi faktörlerle açıklanmaktadır.

SLS methodunun S4 numunesinde 1 mm sehimde yaklaşık 185 N yük taşıdığı görülmüştür. Bu sonuç test edilen S4 numunesiyle hemen hemen aynı değerdedir. Bu durumda SLS yönteminde daha homojen yapıda parçaların üretildiği göstermektedir.



7. YÖNTEMLERİN TEKNİK VE EKONOMİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışmamızın son aşamasında tasarlanan parçaların ekonomik ve teknik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Ürünlerin maliyet analizleri faaliyet gösteren bir firmadan 1000 adet siparişte birim fiyat olarak talep edilmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman FDM yönteminde optimal ürünün 1 numara olduğu gerek üretim zamanı ve gerekse ağırlık açısından anlaşılmaktadır. Yine taşıma kuvveti olarak 1.2 emniyet katsayısına uyduğu görülmektedir. SLS yönteminde ise optimal ürün olarak 4 numaralı ürün olmaktadır. Bu parça 1.2 emniyet katsayısını karşılamaktadır.

Tablo 7.1. Parçaların Ekonomik ve Teknik olarak Kıyaslanması

	Kuvvet [N] (1mm Şehimde]	Design Method	Material	Weight	Cost[\$]
FDM					
S1	182,5	generative	PA+%15CF	4	1,36
S2	212,5	generative	PA+%15CF	5	1,34
S3	185	generative	PA+%15CF	8	1,48
S4	192,5	generative	PA+%15CF	9	1,73
S5	Cancel	generative	PA+%15CF	4	1,19
S6	225	generative	PA+%15CF	12	1,91
S7	Cancel	generative	PA+%15CF	4	1,21
S8	72,5	generative	PA+%15CF	4	1,23
S9	177,5	conventional	PA+%15CF	14	1,94
SLS					
S1	110	generative	PA2200	3,271	0,93
S2	152,5	generative	PA2200	3,807	1,08
S3	137,5	generative	PA2200	6,437	1,75
S4	185	generative	PA2200	6,928	1,92
S5	Cancel	generative	PA2200	3,035	0,86
S6	230	generative	PA2200	9,96	2,55
S7	112,5	generative	PA2200	2,795	0,83
S8	70	generative	PA2200	2,834	0,83
S9	150	conventional	PA2200	11,543	2,84

Tablo incelendiği zaman üretim maliyetleri açısından FDM yöntemi için 1 numaralı ürünün 1.36\$ maliyeti bulunurken, orijinal parçanın ise 1.94\$ olduğu ve bir üründe 0,58\$ fark olduğu tespit edilmiştir. Toplam 1000 ürün üzerinden sonuçlar değerlendirildiği zaman 580 \$ bir tutar farkı oluşacağı, yine orijinal ürün ile bir numaralı ürün arasında 10g malzeme farkı olduğu dikkate alındığı zaman ise 10.000 g malzeme tasarrufu sağlanacağı

görülmüştür. Yine yük taşıma kapasitesi olarak 9 nolu numueye göre %3'luk artış olmuştur.

SLS yöntemi incelendiği ise 4 numaralı ürünün 1.92\$ maliyeti bulunurken, orijinal parçanın ise 2.84\$ olduğu ve bir üründe 0,92 \$ fark olduğu tespit edilmiştir. Toplam 1000 ürün üzerinden sonuçlar değerlendirildiği zaman 920 \$ bir tutar farkı oluşacağı, yine orijinal ürün ile bir numaralı ürün arasında 5.3g malzeme farkı olduğu dikkate alındığı zaman ise 5300 g malzeme tasarrufu sağlanacağı görülmüştür. 9 nolu ürün ise istenen yük taşıma kriterlerini taşımaktadır. 4 nolu ürün bu şartı sağlamakta olup, %23,4 taşıma kapasitesinde artış vardır.

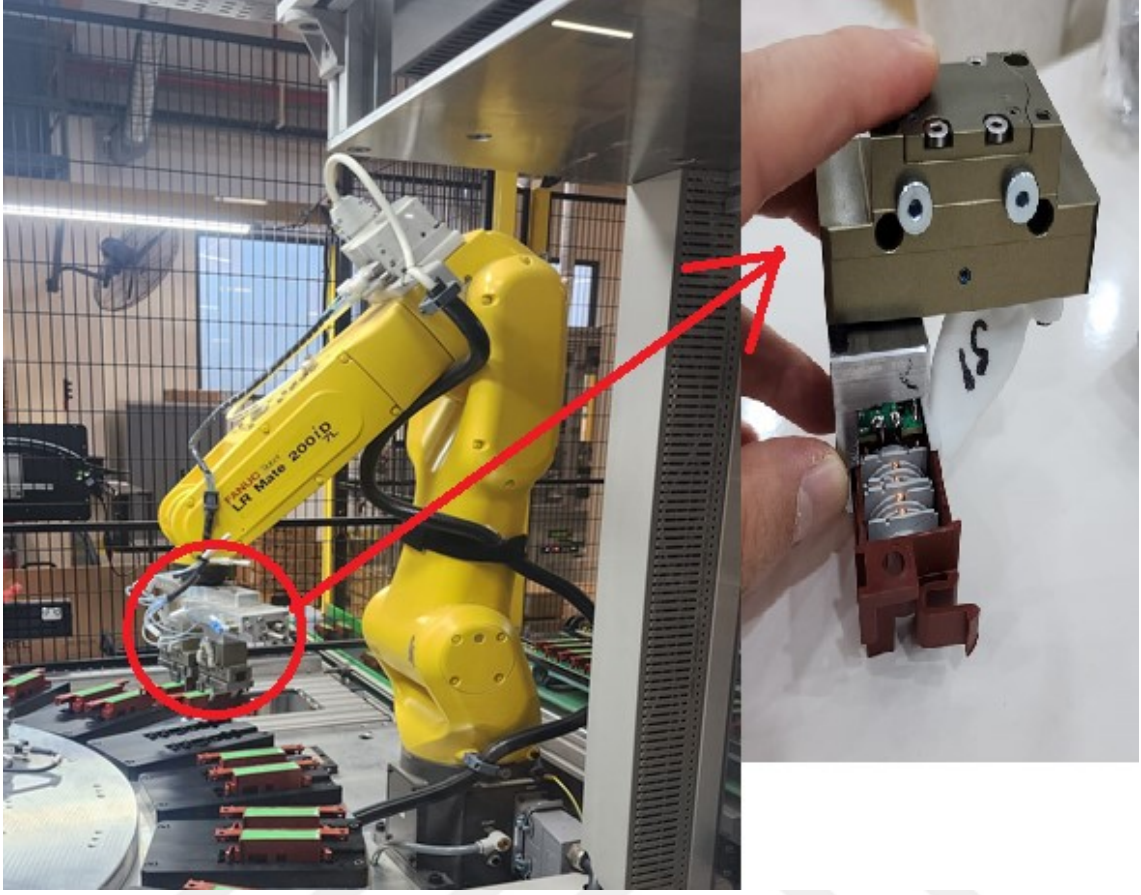
İki yöntem ele alındığında gerek maliyet ve yük taşıma kapasitesi bakımında FDM ile üretilen 1 nolu parça en uygun model olarak karşımıza çıkmaktadır. SLS yönteminde en uygun olan 4 nolu üründür. İki parça kıyaslandığında FDM 1 nolu parça, SLS 4 nolu parçaya göre %42 daha hafif, %29.16 daha ucuz ve yük taşıma kapasite olarak %2,5 daha azdır.

Teknik olarak kıyas yapıldığında, FDM yöntemiyle üretilen parçaların daha heterojen yapıda olduğu, baskı yönüne bağlı olarak dayanımın değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. SLS yönteminin daha homojen yapıda olduğu, parça baskı toleransının ve yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olduğu görülmüştür.

Seçilen malzemenin karakteristiğine bağlı olarak FDM yöntemiyle üretilen CF 15 +PA içerikli parçalar gevrek ve baskı yönünü paralel doğrultuda kırılmalar görülmüştür. PA 2200 ve SLS yöntemli numuneler sünek ve esnek yapıda davranış göstermiştir.

Çalışmanın endüstriyel uygulaması Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Burada S1 numunesi imal edilip endüstriyel tutucuya bağlanmıştır ve uygulama mevcut makinede performans açısından herhangi bir problem yaşamadan sorunsuz bir şekilde çalışmaktadır.

Yapılan bu çalışma hem bilimsel sistematiklik içinde ürün geliştirme ve üretmenin önemini vurgularken ayrıca bu süreç sonunda minimum malzeme sarfiyatı yönüyle sürdürülebilirlik açısından da avantaj sağlamıştır. Önerilen bu sistematik ile sürdürülebilir bir dünya için önemli kazanımlar elde edilecektir.



Şekil 7.1. Endüstriyel Gripper Tutucunun GD Uygulaması

8. TARTIŞMALAR

Yapılan bu bilimsel çalışmada endüstriyel ürün geliştirme süreci için sistematik bir süreç önerilmiş ve bir uygulama yapılmıştır. Uygulama için endüstriyel bir robot için gripper tasarımı konu alınmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında karbon fiber takviyeli naylon6 malzeme için üretim parametreleri optimizasyonu nozül sıcaklığı, baskı hızı ve ısı işlem süresi değişkenleri ile optimize edilmiştir. Sonuç olarak ilk aşamada ağırlık, çekme mukavemeti, % uzama, elastikiyet modülü ve yüzey pürüzlülük değerleri dikkate alınmış, optimal üretim parametresi belirlenmiştir. Ayrıca bu bölümde faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bölümde gerek ağırlık, yüzey pürüzlülüğü ve gerekse diğer özellikler açısından önemli bilimsel kazanımlar elde edilmiştir. Örneğin çekme mukavemeti değeri üretici firma kataloglarında üretim yönünde 103,2 MPA iken, üretim parametrelerindeki optimizasyon ile bu değer 116MPa değerine çıkartılmış ve %12,40 değerinde bir iyileşme sağlanmıştır. Aynı şekilde diğer özelliklerde de iyileşme sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise endüstriyel bir uygulama yapılmış, robot gripper üzerinde ele edilen optimal üretim parametreleri kullanılmak üzere Generative design işlemi gerçekleştirilmiştir. 8 farklı geometri ve orijinal geometri oluşturulmuş, kriter olarak optimal üretim parametreleri ile elde edilen mekanik özellikler kullanılmıştır ve alternatif olarak PA 2200 malzemesiyle SLS yöntemi karşılaştırılmıştır. Ürünler basma testine tabi tutulmuş ve sonrasında veriler analiz edilerek üretim maliyeti de dikkate alınarak nihai ürün seçilmiştir. FDM ile üretilen parça toleransların, SLS yöntemine göre daha geniş olduğu görülmüştür. Buna karşın mukavemet değerleri daha yüksektir. Yapılan bu çalışmada mevcut durumda 14 g olan ürün 4 g malzemeye düşürülmüş, üretim maliyet 1.94\$ iken 1.36\$ 'e düşürülmüştür. Gerek maliyet, taşıma yükü, ve maliyet gerekse görevi açısından 1 numaralı parça sürdürülebilirlik ve çevre dostu bir ürün geliştirme için seçilmiştir.

İlerleyen çalışmalarda karbon fiber filamentin mekanik verileri üzerinde ısı işlemin etkisi farklı sıcaklık ve sürelerde araştırılabilir. Bir endüstriyel uygulama için farklı GD yazılımlarının avantaj ve dezavantajları incelenebilir. Fdm yönteminde basma yönü değiştirilerek mekanik veriler üzerinde etkisi incelenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Vinayak C. Gavalia, Pravin R. Kubadea, Hrushikesh B. Kulkarni, Property Enhancement of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Prepared by Fused Deposition Modeling, *Materials Today*, 2018
- [2] V. Durga Prasada Rao, P. Rajiv, V. Navya Geethika, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings 18 (2019) 2012–2018*, 2018
- [3] K. Sathish Kumar, R. Soundararajan, G. Shanthosh, P. Saravanakumar, M. Ratteesh, Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM, *Materials Today: Proceedings*, 2021
- [4] M. Ajay Kumar, M.S. Khan, S.B. Mishra, Effect of fused deposition machine parameters on tensile strength of printed carbon fiber reinforced PLA thermoplastics, *Materials Today: Proceedings*, 2020
- [5] M. Kamaal, M. Anas, H. Rastogi, N. Bhardwaj, A. Rahaman, Effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D-printed carbon fibre–PLA composite, *Progress in Additive Manufacturing*, 2021
- [6] Demei Lee, Guan-YuWu, Parameters Affecting the Mechanical Properties of Three-Dimensional (3D) Printed Carbon Fiber-Reinforced Polylactide Composites, *Polymers*, 2020
- [7] M.S. Srinidhi, R. Soundararajan, K.S. Satishkumar, S. Suresh, Enhancing the FDM infill pattern outcomes of mechanical behavior for as-built and annealed PETG and CFPETG composites parts, *Materials Today: Proceedings*, 2020
- [8] M. Heidari-Rarani, M. Rafiee-Afarani, A.M. Zahedi, Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Composites Part B*, 2019
- [9] Ning Yu, Xiaoyong Sun, ZhiWang, Daijun Zhanga, Jing Li, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings 18 (2019) 2012–2018*, 2018

- [10] M. Ajay Kumar, M.S. Khan a, S.B. Mishra, Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics, *Materials and Design*,2020
- [11] P. Sethu Ramalingam, K. Mayandi, V. Balasubramanian, K. Chandrasekar, V. Mago Stalany,A. Abdul Munaf, Effect of 3D printing process parameters on the impact strength of onyx– Glass fiber reinforced composites, *Materials Today: Proceedings*,2020
- [12] Vinayak C. Gavalia, Pravin R. Kubadea, Hrushikesh B. Kulkarni, Mechanical and Thermo-mechanical Properties of Carbon fiber Reinforced Thermoplastic Composite Fabricated Using Fused Deposition Modeling Method, *Materials Today: Proceedings*,2019
- [13] Carlos Belei, Jana Joeressen and Sergio T. Amancio-Filho, Fused-Filament Fabrication of Short Carbon Fiber-Reinforced Polyamide: Parameter Optimization for Improved Performance under Uniaxial Tensile Loading, *Polymers*,2022
- [14] Fuda Ning, Weilong Cong, Yingbin Hu and Hui Wang, Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties, *Journal Of Composite Materials*,2016
- [15] M. Heidari-Rarani, M. Rafiee-Afarani, A.M. Zahedi, Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Composites Part B: engineering*, 2019
- [16] Chamil Abeykoon, Pimpisut Sri-Amphorn, Anura Fernando, Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*
- [17] Srijan Rajput, Himanshu Burde, Udit Suraj Singh, Hridik Kajaria, Ranjeet Kumar Bhagchandani, *Materials Today: Proceedings*,2018
- [18] Ersin Toptas, Innovative approach to the design of mechanical parts, *Journal Of Mechatronics And Artificial Intelligence In Engineering*,2020
- [19] I Zaimis, E Giannakis, G Savaidis, Generative design case study of a CNC machined nose landing gear for an unmanned aerial vehicle, *Materials Science and Engineering*,2020

- [20] H. Varyavwala, S.K. Rai, H. Keawmuang, L. Shatnawi, Generative Design of Articulated Rod of Radial Engine, *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 2021
- [21] Jerrin Bright, R Suryaprakash, S Akash, A Giridharan, Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame, *Materials Science and Engineering*, 2021
- [22] M. Fenoon, O. Alquabeh, M.M. Nisar, S. Zia, Generative Design of a Mechanical Pedal, *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 2021
- [23] Thanh Hai Tuan Tran, Dinh Son Nguyen, Nhu Thanh Vo, Design of Delta Robot Arm based on Topology, *5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*, 2020
- [24] Cemile Şanlıer, H. Rıza Börklü, Cengiz Eldem, Dizüstü Bilgisayar Sehpası Tasarımı: Geleneksel Ve Yeni İmalat Yöntemleri İçin Yapılan Tasarımlar ve Karşılaştırılması, *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 2021
- [25] Stefan Junk, Lukas Burkart, Comparison Of CAD Systems For Generative Design For Use With Additive Manufacturing, *Procedia CIRP*, 2021
- [26] I. A. Galfarsoro, A. S. Muñoz, I. C. Alfaro, J. Aurrekoetxea, N. A. Arexolaleiba, Generative design of 3D printed grippers for robot/human collaborative environments, *IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics*, 2021
- [27] Emmanuel Francalanza, Alec Fenecha, Paul Cutajara, Generative design in the development of a robotic manipulator, *Procedia CIRP*, 2018
- [28] Aleksandr Lukin, Svetlana Perepelkina, Galina Demidova, Dmitry Lukichev, Anton Rassölkin, Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Generative Design in Development of Mechanical Components for Magnus Effect-Based Wind Turbine, *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems*, 2020
- [29] M. Kumaran, V. Senthilkumar, Generative Design and Topology Optimization of Analysis and Repair Work of Industrial Robot Arm Manufactured

Using Additive Manufacturing Technology, *Materials Science and Engineering*, 2021

[30] Daniil Valme, Anton Rassolkin, Karolina Kudelina, Toomas Vaimann, Ants Kallaste, Diana Belolipetskaja, Generative Design in Weight Optimization of Reconfigurable Continuous Track Robot, *28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives*, 2021

[31] Berend Denkenaa, Benjamin Bergmanna, Thomas Lepper, Design And Optimization Of A Machining Robot, *17th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry*, 2017

[32] Francesco Buonamici, Monica Carfagni, Rocco Furferi, Yary Volpe, Lapo Governi, Generative Design: An Explorative Study, *Computer-Aided Design & Applications*, 2021

[33] R. Petrov, P. Cvetkov, A. Maksimov, O. Klyavin, On the problem of optimizing the door hinge of electro car by generative design methods, *International Journal Of Mechaics*, 2020

[34] Renold Elsen S, Mahendran T, Piyush P Atkare, Amit A Bhosale, Fabrication of Bio-Scaffold by Additive manufacturing technique for Bone Synthesis using Generative Design, *Materials Science and Engineering*, 2021

[35] Stefan Junk, Nils Rothe, E. Francalanza, A new methodology to analyze the functional and physical fiber-reinforced additive manufacturing Lightweight design of automotive components using generative fiber-reinforced additive manufacturing, *Procedia*, 2022

[36] <https://forward-am.com/>

[37] Hasan Kemal SÜRMEEN, Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2019

[39] <https://www.eos.info/en>

[40] <https://formlabs.com>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Ersin KAYA

Yabancı Dil: İngilizce

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise: Halkalı Mehmet Akif Ersoy Lises, 2007 (4,92/5)

Lisans: Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği, 2011 (GANO:3,17/4)

Lisans: Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2012 (GANO:2,84/4)

Yüksek Lisans: Marmara Üniversitesi ,2023(GANO:3,63/4)

İş Tecrübesi

Üretim Mühendisi – Mustafa Yontar A.Ş. 2013-2017

Üretim ve Bakım Mühendisi – Merkas A.Ş 2017-2018

Kıdemli Ar-Ge Tasarım Mühendisi – Mamur Teknoloji Sistemleri A.Ş. 2018-Halen

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulmuş Bildiriler

Kaya Ersin, Hartomacıoğlu Selim, Gümüş Eker Beril, Optimization Of Process Parameters For Tensile Strength Of 3d Printed Carbon Fiber Based Polyamide Samples, *IV. International Science And Innovation Congress, 2023*

Patentler

Kablo Demeti Mesafe Ayar Methodu ve Tertibatı 2019

Bir Ateşlemeli Birimi İçin Vakum Kontrol Tertibatı ve Kontrolü Metodu 2022

Projeler

Endüstriyel Nonwoven Üretim Tesisleri Kurulumu ve Devreye Alınması 2017

Robotik Kablo Gruplama Otomasyonu 2018

Ateşleme Bobinleri İçin Primer Sarım Hücresi 2019

Ateşleme Bobini Montaj Hattı 2020

Kablo Grubu Üretim Hücreleri İçin Yerli Üretim Altyapısının Geliştirilmesi 2021
(Cumhurbaşkanlığı Hamle Projesi)

Ateşleme Bobini Test Hücresi 2022

Buji Montaj Makinesi 2023

İlgi Alanları

3D Yazıcılar, Üretim Teknolojileri, Montaj Sistemleri, Robotik, Endüstri 4.0,
Otomasyon, Ar&Ge, Malzeme Bilimi

