

**EKLEMELİ İMALAT PROSESİNDE YAPI  
ORYANTASYONUNUN ÇOK-AMAÇLI  
OPTİMİZASYONU**

**Ahmet Can GÜNAYDIN**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT PROSESİNDE YAPI ORYANTASYONUNUN  
ÇOK-AMAÇLI OPTİMİZASYONU**

Ahmet Can GÜNAYDIN  
0000-0001-8489-4088

Prof. Dr. Necmettin KAYA  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Ahmet Can GÜNAYDIN tarafından hazırlanan “EKLEMELİ İMALAT PROSESİNDE YAPI ORYANTASYONUNUN ÇOK-AMAÇLI OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Necmettin KAYA

- |                 |   |      |
|-----------------|---|------|
| <b>Başkan</b> : | Prof. Dr. Necmettin KAYA<br>0000-0002-8297-0777<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                            | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Prof. Dr. Fatih KARPAT<br>0000-0001-8474-7328<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                              | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ<br>0000-0003-1790-6987<br>Bursa Uludağ Üniversitesi,<br>Mühendislik Fakültesi,<br>Makine Mühendisliği Anabilim Dalı                           | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Dr. Öğr. Üy. İsmail ÖZTÜRK<br>0000-0003-2641-5880<br>Pamukkale Üniversitesi,<br>Teknoloji Fakültesi,<br>Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı                             | İmza |
| <b>Üye</b> :    | Dr. Öğr. Üy. Mehmet Onur GENÇ<br>0000-0003-0332-1785<br>Bursa Teknik Üniversitesi,<br>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,<br>Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**09/06/2022**

**Ahmet Can GÜNAYDIN**

**EK 8**  
**TEZ YAYINLANMA**  
**FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Necmettin KAYA  
09.06.2022

Ahmet Can GÜNAYDIN  
09.06.2022

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Doktora Tezi

### EKLEMELİ İMALAT PROSESİNDE YAPI ORYANTASYONUNUN ÇOK-AMAÇLI OPTİMİZASYONU

**Ahmet Can GÜNAYDIN**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Eklemeli imalat, doğrudan bilgisayar destekli tasarım verisinden katman üzerine katman ekleyerek üç boyutlu parçalar oluşturmaya dayanan bir üretim teknolojisidir. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen veya latis yapılarından oluşan, geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi mümkün olmayan, hafifletilmiş tasarımların üretilmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Son yıllarda eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan lazer ile toz yatağı füzyonu prosesi, işlevsel ve yüksek kaliteli metalik parçaların üretimi ile başta havacılık sanayi olmak üzere birçok endüstride kullanılmaktadır. Üç boyutlu parçanın yapı oryantasyonu, parça kalitesi, atık miktarı, üretim süresi ve maliyet gibi birçok faktör üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada, destek yapısı miktarı ve üretim süresi gibi birbiriyle çelişebilecek iki farklı amaç fonksiyonunu eş-zamanlı olarak optimize etmek için, bir çok-amaçlı optimizasyon algoritması olan bastırılmamış sınıflandırmalı genetik algoritma-II kullanılmıştır. Destek yapısı hacmini ve teknolojinin mevcut durumunu yansıtan üretim süresini hesaplamak için tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemle yapı oryantasyonu karmaşık bir parça için optimize edilmiştir ve alternatif sonuçlar görselleştirilerek değerlendirilmiştir. Geliştirilen karar-verme yöntemi ile amaç fonksiyonlarının farklı ağırlıklarına bağlı olarak üç optimum alternatif yapı yönelimi seçilmiştir. Yapı oryantasyonu sürecini doğru bir şekilde gerçekleştirmek için gereken eklemeli imalat için tasarım bilgisi, üretim öncesi işlemlerin otomatikleştirilmesiyle, ortadan kaldırılmıştır. Böylece, destek yapısı hacmini ve üretim süresini en aza indirerek yüksek proses maliyetlerine sahip olan lazer ile toz yatağı füzyonu prosesinin erişilebilirliğine ve sürdürülebilirliğine katkı sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapı oryantasyonu, destek yapısı hacmi, üretim süresi, çok-amaçlı optimizasyon, lazer ile toz yatağı füzyonu

**2022, xvii + 136 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF BUILD ORIENTATION IN ADDITIVE MANUFACTURING

**Ahmet Can GÜNAYDIN**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Necmettin KAYA

Additive manufacturing is a production technology based on creating three-dimensional parts directly from computer-aided design data layer-by-layer. This technology provides a significant advantage in producing topologically optimized or lattices applied lightweight designs that cannot be produced with conventional manufacturing methods. In recent years, it has been used in many industries, especially in the aerospace and medical industry, with the production of functional, high-quality metallic parts with the powder bed fusion process by laser, which is one of the additive manufacturing technologies. The build orientation of the three-dimensional part has a major impact on many factors such as part quality, waste amount, production time, and cost. In this study, a multi-objective optimization is carried out using non-dominated sorting genetic algorithm-II to simultaneously optimize different objectives that may conflict with each other, such as the amount of support structure and build time. Estimation methods are developed for computing the amount of support structure and the build time, which reflect the current state of the technology. With the developed method, build orientation is optimized for a complex part, and the wide range of alternative results are visualized and evaluated. Three optimum alternative build orientations are selected depending on different weights of objectives by developed decision-making mechanism. The design for additive manufacturing knowledge required to perform the build orientation process correctly is eliminated by automating the pre-processing stage. Therefore, the contribution is made to the accessibility and sustainability of the powder bed fusion process by laser, which has high process costs by minimizing support structure volume and build time.

**Key words:** Build orientation, multi-objective optimization, support structure, build time, laser powder bed fusion

**2022, xvii + 136 pages.**

## TEŐEKKÖR

Doktora tez çalıőmam sırasında beni yönlendiren danıőmanım Prof. Dr. Necmettin KAYA'ya ve TUSAŐ Uludağ Üniversitesi Ar-Ge Merkezi Müdürü olarak görev alan Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ'a teőekkürlerimi sunarım. Lisansüstü eğitim hayatım boyunca verdikleri çeşitli burslar ve 118C100 numaralı 2244 - Sanayi Doktora Programı kapsamında sağladıkları destekten ötürü TÜBİTAK'a teőekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim sırasında sağladığı destekten dolayı geçmişte Ar-Ge Mühendisi olarak görev aldığım Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ő.'ye ve günümüzde Teknoloji Geliştirme Mühendisi olarak görev aldığım TUSAŐ - Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ő.'ye teőekkürlerimi sunarım.

Lisans eğitimim sırasında aldığım dersler ile başlayan, bitirme projesi, yüksek lisans ve birçok proje ile devam eden akademik birlikteliğimizde tarafıma kattığı değerler ve gösterdiği örnek davranıőlar sebebiyle bugün bulunduğum konumda çok büyük bir payı olan Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI'ya teőekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere hazırlayan, desteklerini her zaman her konuda hissettiren aileme ve anlayıőı ile her zaman yanımda olan sevgili eőim Cansu GÜNAYDIN'a teőekkürlerimi sunarım.

Ahmet Can GÜNAYDIN  
09/06/2022



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış.....	1
1.2. Tezin Hedefi ve Amaçları.....	2
1.3. Tezin Önemi ve Özgünlüğü.....	2
1.4. Tezin Ana Hatları.....	3
1.4.1. Literatür taraması 1 : havacılık sektöründe eklemeli imalat teknolojisi ve seçici lazer ergitme prosesi.....	4
1.4.2. Literatür taraması 2: optimizasyon yöntemleri.....	4
1.4.3. Literatür taraması 3: destek yapıları ve optimizasyonu.....	4
1.4.4. Literatür taraması 4: yapı oryantasyonu ve optimizasyonu.....	4
1.4.5. Yazılımın geliştirilmesi.....	5
1.4.6. Tahmin modellerinin geliştirilmesi.....	5
1.4.7. Yapı oryantasyonunun çok-amaçlı optimizasyonu.....	5
1.4.8. Yapı oryantasyonunun geometrik doğruluk üzerinde etkilerinin incelenmesi.....	5
1.4.9. Bulguların incelenmesi.....	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisine Giriş.....	7
2.1.1. Tekne fotopolimerizasyon.....	9
2.1.2. Malzeme püskürtme.....	10
2.1.3. Bağlayıcı püskürtme.....	12
2.1.4. Malzeme ekstrüzyonu.....	13
2.1.5. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) prosesi.....	15
2.1.6. Lamine nesne imalatı (LOM) prosesi.....	15
2.1.7. Toz yatağı füzyonu (PBF) prosesleri.....	16
2.2. Eklemeli İmalat ve Geleneksel Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	19
2.3. Eklemeli İmalat Prosesinde Aşılması Gereken Zorluklar.....	20
2.3.1. Parçanın optimizasyonu.....	21
2.3.2. Eklemeli imalat için tasarım.....	22
2.3.3. Üretim öncesi ve sonrası işlemler.....	23
2.3.4. Üretim yöntemleri.....	25
2.3.5. Hata kontrolü.....	26
2.3.6. Çok-malzemeli üretim.....	29
2.3.7. Cihaz ve bakım sorunları.....	29
2.3.8. Yapı oryantasyonu.....	30
2.3.9. Dilimleme.....	30
2.3.10. Hız.....	31
2.4. Havacılık ve Uzay Sektöründe Sağlanan Avantajlar.....	32
2.4.1. Yeni tasarım sınırları sağlaması.....	32
2.4.2. Çok bileşenden oluşan montajların birleştirilebilmesi.....	34

2.4.3. Yüksek karmaşıklığa sahip parçaların üretilmesi .....	35
2.4.4. Ağırlık azalması için avantaj sağlaması .....	36
2.4.5. Malzeme araştırma ve uyarlama aracı olarak kullanılabilmesi.....	37
2.4.6. Yerinde imalat ve montaj .....	38
2.4.7. Yerinde kaynak oluşturma .....	38
2.5. Havacılık Sektöründe Eklemeli İmalat Uygulamaları .....	39
2.5.1. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi ile gerçekleştirilen uygulamalar .....	39
2.5.2. Toz yatak füzyonu (PBF) yöntemi ile gerçekleştirilen uygulamalar .....	41
2.6. STL Dosya Tipi.....	43
2.7. Destek Yapıları.....	46
2.8. Yapı Oryantasyonu.....	50
2.9. Eklemeli İmalat Proses Simülasyonu.....	54
2.10. Optimizasyon Yöntemleri .....	55
2.10.1. Tek-amaçlı optimizasyon .....	56
2.10.2. Çok-amaçlı optimizasyon.....	58
2.10.3. Bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma-II.....	61
2.11. Yapı Oryantasyonunun Optimizasyonu .....	68
2.12. Destek Yapılarının Optimizasyonu .....	73
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	81
3.1. Yazılımın Geliştirilmesi .....	81
3.2. Sarkan Unsurların Tespit Edilmesi .....	84
3.2.1. Sarkan yüzeylerin tespit edilmesi .....	85
3.2.2. Sarkan kenarların tespit edilmesi .....	86
3.2.3. Sarkan noktaların tespit edilmesi .....	87
3.3. Destek Yapısı Miktarının Tahmin Edilmesi .....	88
3.3.1. Yüzey alanı yöntemi .....	89
3.3.2. Yansıtılmış yüzey alanı yöntemi.....	89
3.3.3. Hacim yöntemi .....	90
3.4. Üretim Süresinin Tahmin Edilmesi.....	91
3.5. Parça Yerleşiminin Çok-amaçlı Optimizasyonu.....	94
3.6. Karar-verme Mekanizmasının Geliştirilmesi.....	98
3.7. Yapı Oryantasyonunun Geometrik Doğruluğa Etkisinin İncelenmesi.....	98
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	100
4.1. Yapı Oryantasyonunun Parçanın Geometrik Doğruluğu Üzerinde Etkisinin İncelenmesi .....	100
4.1.1. Ortalama kesit alanının etkisi.....	100
4.1.2. Üretim doğrultusundaki kesit alanı dağılımının etkisi .....	102
4.1.3. Ani kesit değişimlerinin etkisi .....	103
4.1.4. Bulguların değerlendirilmesi.....	104
4.2. Destek Yapısı Miktarı Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	105
4.3. Yapı Oryantasyonunun Çok-amaçlı Optimizasyonu .....	108
5. SONUÇ .....	115
KAYNAKLAR .....	121
ÖZGEÇMİŞ .....	136

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$OA$	Sarkma Açısı
$\theta$	Yüzeyin tabla ile yaptığı açı
$l$	Üretilebilir en uzun köprü mesafesi
$i$	Bir değişkenin indeksini belirten jenerik bir sayı
$f(x)$	Amaç fonksiyonu
$g_j(x)$	$j$ 'inci eşitsizlik kısıtı
$h_k(x)$	$k$ 'inci eşitsizlik kısıtı
$x_i$	$i$ 'inci karar değişkeni
$x_i^L$	$i$ 'inci karar değişkeninin alt sınırı
$x_i^U$	$i$ 'inci karar değişkeninin üst sınırı
$f_m(x)$	$m$ 'inci amaç fonksiyonu
$\sigma_{share}$	NSGA için paylaşım fonksiyonu
$N$	Adet belirtmek için kullanılan jenerik bir sayı
$p$	NSGA-II'deki her bir çözüm
$n_p$	Üstünlük sayısı
$S_p$	$p$ çözümünün bastırıldığı çözümlerin kümesi
$q$	$S_p$ kümesinin her bir üyesi
$Q$	Üstünlük katsayısının sıfır olduğu durumda $q$ 'ların eklendiği liste
$J$	Baskın olmayan bir küme
$J[i].m$	$J$ kümesindeki $i$ 'inci bireyin $m$ 'inci amaç fonksiyonu değeri
$f_m^{max}$	$m$ 'inci amaç fonksiyonunun maksimumu
$f_m^{min}$	$m$ 'inci amaç fonksiyonunun minimumu
$<_n$	Kalabalık karşılaştırma operatörü
$i_{rank}$	Bastırılmamışlık derecesi
$i_{distance}$	Kalabalık-mesafesi
$P_0$	Ebeveyn popülasyonu
$Q_0$	Yavru popülasyonu
$R_t$	Ebeveyn ve yavru popülasyonunun birleşimi
$\mathcal{F}_1$	En iyi baskın olmayan küme
$f$	Birleşik amaç fonksiyonu
$w_i$	$i$ 'inci amaç fonksiyonunun ağırlığı
$f_i(x)$	$m$ 'inci amaç fonksiyonu
$\theta_i$	$i$ 'inci faset ile tabla arasındaki açı
$\vec{n}_i$	$i$ 'inci yüzeyin normali
$\vec{n}_b$	Üretim yönünün tersini temsil eden vektör
$\vec{n}_e$	Sarkan kenar için hesaplanan normal
$\vec{n}_1$	Birinci sarkan kenarın yüzey normali
$\vec{n}_2$	İkinci sarkan kenarın yüzey normali
$\theta_e$	Sarkan kenarın açısı
$\vec{n}_p$	Sarkan nokta için hesaplanan normal
$\vec{n}_j$	Sarkan noktayı paylaşan $j$ 'inci fasetin yüzey normali

$FC$	Sarkan noktayı paylaşan yüzeylerin sayısı
$\theta_p$	Sarkan noktanın açısı
$A_i$	$i$ 'inci fasetin alanı
$v_i$	$i$ 'inci fasetin koordinatları, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$
$v_{i1}$	$i$ 'inci fasetin birinci koordinatı, $v_{i1} = (v_{i1x}, v_{i1y}, v_{i1z})$
$A_s$	Sarkan alanların toplamı
$K$	Kontrol değişkeni, $\theta_i < OA$ olduğu durumda $K = 1$ , değilse $K = 0$
$A_{ps}$	Sarkan fasetlerin yansıtılmış alanlarının toplamı
$V_{st}$	Sarkan fasetler ile tabla arasında kalan hacim
$I_{iz}$	Kesişme noktasının z eksenindeki değeri, kesişme olmadığı durumda $I_{iz} = 0$
$V_s$	Destek yapısı gerektiren hacim
$t_{realistic-build}$	PBF-L prosesi için gerçekçi üretim süresi
$X_{inner_i}$	$i$ 'inci katmandaki kesit alanında taranacak toplam iç mesafe
$X_{contour_i}$	$i$ 'inci katmandaki kesit alanında taranacak toplam kontur mesafesi
$v_{inner}$	Katmanların iç bölgesini üretmek için kullanılan lazer hızı
$v_{contour}$	Katmanların dış konturunu üretmek için kullanılan lazer hızı
$L_c$	Katman sayısı
$t_{recoat}$	Yeniden serme süresi
$N_L$	Lazer sayısı
$h_{zmax}$	Üretim doğrultusunda parçanın en büyük z koordinatı
$d_z$	Tabla ile parça arasında bırakılan boşluk
$L_t$	Katman kalınlığı
$t_{build}$	Üretim süresi
$V_p$	Parça hacmi
$r_{vf}$	Destek yapısı hacim oranı
$A_p$	Parçanın dış düzeylerinin toplamı
$X_h$	Tarama mesafesi
$f_1(\varphi)$	Birinci amaç fonksiyonu, destek yapısı miktarı ( $V_s r_{vf}$ )
$f_2(\varphi)$	İkinci amaç fonksiyonu, üretim süresi ( $t_{build}$ )
$g_1(\varphi)$	Birinci kısıt, kapsayıcı kutunun x eksenindeki ölçüsü
$BT_x$	Üç boyutlu yazıcı ile x ekseninde üretilebilir en büyük ölçü
$g_2(\varphi)$	İkinci kısıt, kapsayıcı kutunun y eksenindeki ölçüsü
$BT_y$	Üç boyutlu yazıcı ile y ekseninde üretilebilir en büyük ölçü
$g_3(\varphi)$	İkinci kısıt, kapsayıcı kutunun z eksenindeki ölçüsü
$BT_z$	Üç boyutlu yazıcı ile z ekseninde üretilebilir en büyük ölçü
$\varphi$	Problem değişkenleri, $\varphi = (\{\theta_x, \theta_y\})$
$\theta_x$	x eksenindeki dönme miktarı, $0^\circ \leq \theta_x \leq 360^\circ$
$\theta_y$	y eksenindeki dönme miktarı, $0^\circ \leq \theta_y \leq 360^\circ$
$A_m$	Ortalama kesit alanı
$A_{csi}$	$i$ 'inci katmandaki kesit alanı
$\%error$	Bağıl hata
$A_{method}$	Şekil 4.6'da A unsuru için ilgili metot ile hesaplanan destek yapısı miktarı

$Feature_{method}$	Şekil 4.6’da ilgili unsur için ilgili metot ile hesaplanan destek yapısı miktarı
$A_{real}$	Şekil 4.6’da A unsuru için hesaplanan gerçek destek yapısı miktarı
$Feature_{real}$	Şekil 4.6’da ilgili unsur için hesaplanan gerçek destek yapısı miktarı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
3D	Üç Boyutlu
API	Uygulama Programlama Arayüzü
ARFL	Amerikan Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DE	Diferansiyel Gelişim
DED	Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
DfAM	Eklemeli İmalat için Tasarım
DLP	Dijital Işık İşleme
DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme
DOD	Talep Üzerine Bırakma
EBM	Elektron Işını ile Ergitme
FDM	Eriyik Yığıma Modelleme
FGM	Fonksiyonel olarak Derecelendirilmiş Malzemeler
GA	Genetik Algoritma
GD&T	Geometrik Ölçülendirme ve Tolerans
ITSP	Yinelemeli Tabu Arama Prosedürü
LENS	Lazer Net-Şekil Mühendisliği
LMD	Lazer Metal Yığıma
LOM	Lamine Nesne İmalatı
MMC	Dönüştürülebilir Bileşenleri Taşıma
MMV	Dönüştürülebilir Boşlukları Taşıma
MOGA	Çok-amaçlı Genetik Algoritma
NSGA	Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma
NSGA-II	Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma-II
PBF	Toz Yatağı Füzyonu
PBF-L	Lazer ile Toz Yatağı Füzyonu
PESA	Pareto Zarflama-Temelli Seçim Algoritması
PLA	Polilaktik Asit
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SA	Benzetimli Tavlama
SIMP	Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme
SLA	Stereolithography
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SPEA	Kuvvet Pareto Evrimsel Algoritması
SSB	T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı
STL	Standart Mozaikleme Dili
VEGA	Vektör Değerlendirmeli Genetik Algoritma
ZPR	Zhang-Paulino-Ramos

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. a) SLA prosesi ve b) DLP prosesinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.2. Bir malzeme püskürtme prosesi olan Polyjet teknolojisinin şematik gösterimi .....	11
Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme yönteminin şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.4. FDM prosesinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.5. DED prosesinin şematik gösterimi .....	15
Şekil 2.6. LOM prosesinin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.7. SLM prosesinin şematik gösterimi (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	17
Şekil 2.8. EBM prosesinin şematik gösterimi (Syam ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	18
Şekil 2.9. ARFL'e göre a) birinci grubu temsil eden, b) ikinci grubu temsil eden, c) üçüncü grubu temsil eden, d) dördüncü grubu temsil eden ve e) beşinci grubu temsil eden parça örnekleri (Todorov ve ark. 2014'ten değiştirilerek alınmıştır) .....	20
Şekil 2.10. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen ilk tasarım (sol) ve PBF prosesi için üretim kısıtları gözetilerek yapılan tasarım (sağ) (ISO-ASTM 52911-1).....	21
Şekil 2.11. Üretilmek istenen parça (sol), FDM prosesinde meydana gelen bir hata sonucunda üretilen parça (sağ) (Oropallo ve Piegler, 2016).....	26
Şekil 2.12. Kapsama problemi (Oropallo ve Piegler, 2016) .....	31
Şekil 2.13. Roket nozüllerinin eklemeli imalat ile üretilmesi (Hofmann ve ark. 2014'ten değiştirilerek alınmıştır) .....	33
Şekil 2.14. Bir quadcopter örneği (Shapiro ve ark. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır).....	34
Şekil 2.15. Kafes yapıları örneği (Zheng ve ark. 2014'den değiştirilerek alınmıştır).....	34
Şekil 2.16. Airbus tarafından alüminyum malzemeden üretilen Eurostar 3000 uydu parçası (Shapiro ve ark. 2016) .....	35
Şekil 2.17. Optimize edilerek eklemeli imalat ile üretilen bir parça örneği (Shapiro ve ark. 2016) .....	36
Şekil 2.18. Sentinel-1'in anten desteği (Shapiro ve ark. 2016).....	37
Şekil 2.19. ATHLETE robotu (Shapiro ve ark. 2016) .....	38
Şekil 2.20. LASERTEC 65 3D sistemi kullanılarak gerçekleştirilen (a) çok-eksenli biriktirme, (b) çok-eksenli yüzey işleme ve (c) bitmiş parça (Liu ve ark. 2017) .....	40
Şekil 2.21. IN718 ile üretilen bir helikopter motoru yanma odası üretimi örneği (a) ince duvarlı parçanın biriktirilmesi, çok-eksenli biriktirme ve (c) bitmiş parça (Liu ve ark. 2017) .....	40
Şekil 2.22. Gaz türbini egzozunun altıda bir ölçekli karıştırma nozülü (Liu ve ark. 2017) .....	41
Şekil 2.23. Ti-6Al-4V malzemesinden üretilen ve iç kanalları bulunan kanat profili (Liu ve ark. 2017) .....	41
Şekil 2.24. EOS cihazı ile üretilen GE yakıt nozülü (Liu ve ark. 2017).....	42
Şekil 2.25. Airbus A350 XWB'de eklemeli üretim kullanılarak üretilen ilk	

	titanyum braket konektörü (Liu ve ark. 2017).....	43
Şekil 2.26.	Bir CAD modelin STL ile yaklaşık olarak temsil edilmesi ( <i>STL (file format)</i> , 2021) .....	43
Şekil 2.27.	Farklı faset sayıları ile üretilen küreler ve geometrik doğrulukları .	44
Şekil 2.28.	a) Doğru ve kabul edilebilir temsil ve b) yanlış ve geçersiz temsil.	45
Şekil 2.29.	Noktaların yönelimi ve yüzey normali .....	45
Şekil 2.30.	Bir parça üzerindeki geometrik unsurlar .....	47
Şekil 2.31.	Destek yapılarının görevleri a) yazdırılabilir yüzey oluşturmak, b) devrilmeyi önlemek, c) termal çarpılmayı engellemek ve d) ısı dağılımının her yerde eşit olarak dağıtılabilmesi.....	48
Şekil 2.32.	Farklı tip destek yapısı tipleri (Krol ve ark. 2012) .....	50
Şekil 2.33.	Yapı oryantasyonunun destek yapısı gereksinimine etkisi .....	51
Şekil 2.34.	Aynı parçanın farklı yapı oryantasyonlarında gösterimi .....	52
Şekil 2.35.	Merdiven etkisi .....	53
Şekil 2.36.	a) ısı girişinden kaynaklanan çarpılma ve b) soğumadan kaynaklanan çekme .....	53
Şekil 2.37.	a) 90° yapı oryantasyonunda üretilmiş parça ve b) 0° yapı oryantasyonunda üretilmiş parça .....	54
Şekil 2.38.	Genetik algoritmanın temel çalışma prensibi .....	58
Şekil 2.39.	Çok-amaçlı optimizasyon problemine bir örnek (Deb ve Deb 2014'den değiştirilerek alınmıştır) .....	59
Şekil 2.40.	Pareto optimal cephe örneği .....	60
Şekil 2.41.	Kalabalık-mesafesi hesaplaması (Deb ve ark. 2002'den değiştirilerek alınmıştır).....	64
Şekil 2.42.	NSGA-II prosedürü (Deb ve ark. 2002'den değiştirilerek alınmıştır)	67
Şekil 2.43.	a) Üretilmesi için destek yapısı gereken orijinal tasarım ve b) destek yapısı olmadan üretilen tasarım (Li ve ark. 2017'den değiştirilerek alınmıştır) .....	74
Şekil 2.44.	Geometrinin değiştirilmesi ile destek yapısı miktarının azaltılması (Hu ve ark. 2015) .....	74
Şekil 2.45.	Vanek ve ark. tarafından geliştirilen, konilere dayalı, destek yapısı oluşturma yöntemi (Vanek ve ark. 2014) .....	76
Şekil 2.46.	Destek yapısı oluşturma süreci: a) desteklenecek noktaların dağılımının belirlenmesi, b) faset ve bir ışının kesişme noktasının belirlenmesi, c) tek bir destek yapısının oluşturulması, d) destek yapılarının oluşturulması ve e) özel noktalar ile işlemler (Zhang ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır).....	76
Şekil 2.47.	a) Ağaç tipi destek yapısının iki boyutlu gösterimi, b) düğümlerin z-koordinatlarının PSO ile belirlenmesi ve c) daha az hacimli bir topolojiye sahip olan ağgözlü bir strateji (Feng ve ark. 2021'den değiştirilerek alınmıştır).....	77
Şekil 2.48.	Kademeli hücrese destek yapıları (Strano ve ark. 2013'den değiştirilerek alınmıştır).....	78
Şekil 2.49.	Önerilen yöntemin iş-akış şeması (Bartsch ve ark. 2019'dan değiştirilerek alınmıştır).....	79
Şekil 2.50.	Düzgün yük dağılımı ve sarkma açısı kısıtları doğrultusunda konsol giriş probleminin çözümü (Liu ve ark. 2019'den değiştirilerek alınmıştır)..	80
Şekil 3.1.	Destek yapılarının optimizasyon taksonomisi (Jiang ve ark. 2018'den	

	değiştirilerek alınmıştır).....	81
Şekil 3.2.	STL dosya formatında bulunan verilerin işlenmesi.....	82
Şekil 3.3.	STL dosya tipinin a) gösterimi ve b) her bir fasetin rastgele renk ile gösterimi .....	84
Şekil 3.4.	Bir fasetin eklemeli imalat prosesinde kullanımının şematik gösterimi	85
Şekil 3.5.	Sarkan kenarın şematik gösterimi.....	86
Şekil 3.6.	Sarkan noktanın şematik gösterimi.....	87
Şekil 3.7.	Sarkan yüzeyden oluşturulması planlanan destek yapısının kendi geometrisi ile kesişmesi durumu.....	91
Şekil 3.8.	Eklemeli imalat prosesinde kullanılan bazı terimlerin gösterimi ....	93
Şekil 3.9.	Oluşturulan destek yapısı tipleri a) 3 mm aralıkla oluşturulan iğne destek yapısı tipi ve b) 4 mm aralıkla oluşturulan kare destek yapısı tipi ..	94
Şekil 3.10.	Yapı oryantasyonu sonucunda oluşan maksimum ölçüler ve yazıcı sınırları ile etkileşimi .....	96
Şekil 3.11.	Bir havacılık braketinin geliştirilen yöntem ile görsel değerlendirilmesi	96
Şekil 3.12.	a) Konik geometriye sahip STL verisi, b) koninin orta noktasından alınan üç boyutlu kesit ve c) koninin ortasından alınan iki boyutlu kesit ..	99
Şekil 4.1.	Üretim doğrultusu boyunca kesit alanı değişmeyen test numunesi için gerçekleştirilen proses simülasyonları (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır) .....	101
Şekil 4.2.	a) Üretim doğrultusunda kesit alanı azalan yapı oryantasyonu ve b) üretim doğrultusunda kesit alanı artan yapı oryantasyonu (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır) .....	102
Şekil 4.3.	Koni şeklindeki numune için üretim doğrultusundaki kesit alanı dağılım grafiği (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır).....	103
Şekil 4.4.	Test numunesinin üç farklı yapı oryantasyonu için gerçekleştirilen proses simülasyonları (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır) ...	104
Şekil 4.5.	Üç farklı yapı oryantasyonunda üretim doğrultusu boyunca kesit değişimleri (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır) ..	104
Şekil 4.6.	Destek yapısı gereksiniminin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması.....	107
Şekil 4.7.	Destek yapısı hacmi için elde edilen sonuçlar .....	109
Şekil 4.8.	Üretim süresi için elde edilen sonuçlar.....	110
Şekil 4.9.	Destek yapısı hacmi ve üretim süresi için elde edilen çözümler ve Pareto cephe .....	111
Şekil 4.10.	Yapı oryantasyonu 1: her iki amaç fonksiyonunun da eşit öneme sahip $w_1, w_2 = (0,5, 0,5)$ .....	112
Şekil 4.11.	Yapı oryantasyonu 2: destek yapısı miktarı daha önemli $w_1, w_2 = (0,8, 0,2)$ .....	112
Şekil 4.12.	Yapı oryantasyonu 3: üretim süresi daha önemli $w_1, w_2 = (0,2, 0,8)$ .	113
Şekil 4.13.	İncelenen üç yapı oryantasyonunun tabla üzerindeki gösterimi.....	114



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat prosesleri ve kullanılan malzemeler .....	8
Çizelge 2.2. ISO/ASTM 52911’de verilen parça yerleşim önerileri .....	27
Çizelge 3.1. Havacılık braketinin bazı özellikleri .....	97
Çizelge 3.2. Optimizasyon ve tahmin modellerinde kullanılan bazı parametreler ve değerleri.....	97
Çizelge 3.3. Proses simülasyonu gerçekleştirilen parametreler .....	98
Çizelge 4.1. Destek yapısı gereksinimi (SR) hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (A unsuru referans alınarak) .....	107
Çizelge 4.2. Farklı ağırlıklar için geliştirilen karar-verme algoritması ile elde edilen sonuçlar .....	111

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel Bakış

Eklemeli imalat teknolojisi Bilgisayar Destekli Tasarım (*Computer Aided Design, CAD*) verisinden alınan bilgiler doğrultusunda malzemenin birbiri üzerine eklenmesi ile ürünün üretilmesini sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu teknoloji ile tasarımın imalatı doğrudan gerçekleştirilebilir ve geleneksel imalat tekniklerinde bulunan birçok kısıtlamaya tabi değildir. Üretim teknolojisindeki bu değişim, var olan karmaşık tasarımların üretilebilmesinin yanında, bazı kısıtlara bağlı kalmadan, birçok avantaj sağlayacak şekilde ürünlerin yeniden tasarlanmasının önünü açmaktadır. Bu nedenle, eklemeli imalat teknolojisinin, dünya genelinde devrim niteliğinde olduğu kabullenilmiştir. Kullanılan malzemeye veya yönteme göre sınıflandırılmış birçok farklı eklemeli imalat prosesi bulunmaktadır. Bu proseslerin her birinin kendi sınırları ve zorlukları vardır.

Metalik parçaların doğrudan üretimi için, Seçici Lazer Ergitme (*Selective Laser Melting, SLM*) prosesi kendini kanıtlamış bir teknolojidir. SLM prosesi, geniş bir malzeme yelpazesine sahiptir ve hafif yapısal bileşenlerin üretilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Yine de bu teknolojiyi kullanarak işlevsel metal parçaların üretilmesinin hem endüstri hem de araştırmacılar için birçok zorluğu vardır. Bu zorluklardan en büyüğü güvenilir ve tekrarlanabilir parça üretiminin henüz çözüme kavuşturulamamasıdır. Yüksek hacimli işlevsel parçaların üretilebilmesi için bu sorunun çözülmesi gerekmektedir. Bu sorunlar prosesin yeterince anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer birçok eklemeli imalat prosesinin aksine SLM prosesinde yüksek ısı girdisi ve soğuma işlemlerinin sürekli olarak tekrarlanmasından kaynaklanan bir kalıntı gerilme oluşmaktadır. Bu kalıntı gerilmelerden ötürü üretilmek istenen parçada çarpılmalar meydana gelmekte ve hataya sebep olmaktadır.

SLM prosesinde her bir parça için üretim hazırlık işlemleri yeniden yapılmalıdır. Bu işlemler sırasında birçok farklı etmen göz önünde bulunmalıdır ve yüksek tecrübe gerektirmektedir. Proses hazırlık aşamalarından biri olan yapı oryantasyonu (parçanın tezgah tablasındaki yönelimi) her zaman ilk bakışta doğru tayin edilemeyebilir. Farklı yapı oryantasyonları sonucunda proses için olması gerekenden daha fazla hammadde, daha fazla zaman ve para harcanabilir. Hatta bazı durumlarda proses başarısızlığa

uğrayabilir. Bu durum, özellikle karmaşık parçaların üretilmesinde, prosesin belirsizliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Prosesin anlaşılması ve farklı etmenlerin doğru oranda değerlendirilmesi ile üretilen parçanın kalitesine, üretim süresine ve maliyetine bir öngörü sağlanabilir ve optimizasyonu mümkün kılınabilir.

## **1.2. Tezin Hedefi ve Amaçları**

Bu tezin hedefi, ilk yatırım maliyetinin yanında proses maliyetinin de oldukça yüksek olduğu SLM prosesinde, destek yapılarının ve üretim süresinin eş-zamanlı optimize edilmesidir. Birbirleri ile çelişebilen destek yapısı gereksiniminin ve üretim süresinin göz önünde bulundurulmasıyla, en uygun yapı oryantasyonu belirlenerek atık malzeme miktarı azaltılabilecek, proses kalitesi artırılabilir, üretim süresi ve üretim maliyeti azaltılabilecektir. Böylece prosesin ulaşılabilirliği ve sürdürülebilirliği artırılabilecektir. Bu hedefe aşağıdaki amaçlar doğrultusunda ulaşılmıştır.

- Yapı oryantasyonunun ve destek yapısı kullanımının prosese etkilerinin incelenmesi
- Destek yapısı miktarının tahmini için yenilikçi bir yöntem geliştirilmesi
- Üretim süresinin tahmini için yenilikçi bir yöntem geliştirilmesi
- Yapı oryantasyonunun çok-amaçlı olarak optimize edilmesi

## **1.3. Tezin Önemi ve Özgünlüğü**

İlk yatırım ve proses maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle ülkemizde metal malzeme kullanan eklemeli imalat prosesinin kullanımı sınırlı kalmıştır. Bu tezde ilgili hedeflere ulaşabilmek için prosesin en önemli dezavantajlarından olan destek yapılarının ve üretim süresinin optimize edilmesiyle üretim maliyeti azaltılabilmektedir. Geliştirilen yöntemler ile mühendislik gereksinimi azaltılmış, parça kalitesi artırılmış ve proses daha ulaşılabilir hale getirilmiştir. Böylece Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Türkiye’de teknoloji devrimi yaratacak 10 hedeften biri olarak belirlenen eklemeli imalat teknolojileri kapsamındaki hedeflere ve T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı’nın (SSB) hazırladığı “Eklemeli İmalat Teknolojileri Yol Haritası” raporunda bahsi geçen hedeflere katkı sağlanmıştır.

Eklemeli imalat proseslerinde, üretim öncesi işlemlerin en önemli adımlarından biri olan, yapı oryantasyonunun belirlenmesi için son yıllarda bazı çalışmalar yapılmış ve yöntemler geliştirilmiştir. Ancak farklı eklemeli imalat proseslerinin farklı gereksinimleri bulunmaktadır ve üretim hazırlığı sırasında genellikle insan müdahalesi gerekmektedir. Bu müdahale, Eklemeli İmalat için Tasarım (*Design for Additive Manufacturing, DfAM*) bilgileri gerektirdiği için yetkin kişiler tarafından yapılmalıdır.

Tez çalışmalarında ilk adım olarak eklemeli imalat proseslerinde sıklıkla kullanılan Standart Mozaikleme Dili (*Standard Tessellation, STL*) dosya tipinin anlaşılması ve amaç fonksiyonlarının STL verisi içerisindeki değişkenlerle hesaplanması üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda, amaç fonksiyonu olarak kullanılan destek yapısı hacmi ve üretim süresini tahmin etmek için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler ile literatürde kullanılan tahmin yöntemleri karşılaştırılarak, avantajlar ortaya konmuştur.

Tek-amaçlı optimizasyon algoritmaları, birden fazla ve hatta birbirleriyle çelişebilen amaçlar gözetilerek oluşturulan optimizasyon problemlerinde yetersiz kalmaktadır. İkinci adımda, bu probleme çözüm üretmek için çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımıyla, yapı oryantasyonu, birbiri ile çelişen iki amaç fonksiyonu gözetilerek eş-zamanlı olarak optimize edilmiştir.

Üçüncü adımda ise çok-amaçlı optimizasyon ile belirlenen alternatif yapı oryantasyonları içerisinden isterler doğrultusunda en uygun sonucu elde etmek için bir karar-verme yöntemi geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar Python programlama dili üzerinde geliştirilen bir yazılım ile otomatik hale getirilmiştir. Böylece, parçanın tabla üzerine doğru yerleştirilmesi ve yeterli miktarda destek yapısı kullanılması ile üretilmek istenen parçanın yüzey kalitesi ve geometrik doğruluğu iyileştirilmiştir. Bununla birlikte üretim için gereken süre, atık malzeme miktarı ve maliyet azaltılmıştır.

#### **1.4. Tezin Ana Hatları**

Tezin içeriği kapsamında yapılan çalışmalara ait bilgiler kısa özetler halinde aşağıda verilmiştir.

#### **1.4.1. Literatür taraması 1: havacılık sektöründe eklemeli imalat teknolojisi ve seçici lazer ergitme prosesi**

Eklemeli imalat prosesi konusunda genel bir bakış sunulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak eklemeli imalat prosesinin sınıflandırılması, eklemeli imalat proseslerinde kullanılan malzemeler ve farklı proseslerin çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir. Eklemeli imalat ve geleneksel üretim yöntemleri arasındaki farklılıklar ve bu farklılıkların havacılık sektöründeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Havacılık sektörü özelinde, eklemeli imalat teknolojisinde aşılması gereken zorluklar tespit edilerek genel bir bilgi verilmiştir. Son olarak havacılık sektöründeki eklemeli imalat uygulamaları incelenmiştir.

#### **1.4.2. Literatür taraması 2: optimizasyon yöntemleri**

Optimizasyon probleminin tanımlanması ve farklı problemlerin çözümü için geliştirilen farklı optimizasyon algoritmaları incelenerek genel bir bakış sunulmuştur. Tek-amaçlı ve çok-amaçlı optimizasyon yöntemleri incelenerek farkları ortaya konmuştur. Tez kapsamında çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesi için kullanılan Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*, NSGA-II) detaylı olarak incelenmiştir.

#### **1.4.3. Literatür taraması 3: destek yapıları ve optimizasyonu**

Eklemeli imalat prosesinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kullanılan destek yapıları detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde destek yapılarının görevleri, farklı tipleri, prosese ve parça kalitesine etkisi ele alınmıştır. Son olarak destek yapılarının optimizasyonu için literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

#### **1.4.4. Literatür taraması 4: yapı oryantasyonu ve optimizasyonu**

Eklemeli imalat teknolojilerinde önemli bir etkiye sahip olan yapı oryantasyonuna genel bir bakış sunulmuştur. Yapı oryantasyonunun destek yapısı miktarı, parça kalitesi, üretim süresi ve üretim maliyeti üzerindeki etkilere detaylı olarak incelenmiştir. Aynı geometrinin farklı yapı oryantasyonları sonucunda oluşabilecek etkiler analiz edilmiştir.

Son olarak yapı oryantasyonunun optimizasyonu kapsamında literatürde yapılan çalışmalar incelenerek özetlenmiştir.

#### **1.4.5. Yazılımın geliştirilmesi**

Tez kapsamında belirlenen hedeflere ulaşmak için gereksinimler göz önünde bulundurularak ihtiyaç duyulabilecek işlemler öngörülmüştür. Bu öngörüler çerçevesinde birçok farklı ücretsiz kütüphaneye sahip olan Python programlama dili seçilmiştir. Eklemeli imalat proseslerinde sıklıkla kullanılan STL dosya tipi incelenerek yapı oryantasyonunun optimizasyonunda kullanılacak amaç fonksiyonlarının hesaplanması için veri setleri oluşturulmuştur. Bu verilerin incelenmesi ve değerlendirilmesi için birçok fonksiyon geliştirilmiştir. Bu bölümde geliştirilen yazılım ve kullanılan kütüphanelere genel bir bakış sunulmuştur.

#### **1.4.6. Tahmin modellerinin geliştirilmesi**

Tez kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında destek yapısı hacmi ve üretim süresi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Bu bölümde geliştirilen tahmin modelleri incelenmiş ve literatürde tespit edilen eksiklikler ile alakalı bilgi verilmiştir. Son olarak, bu eksiklikleri gidermek ve amaç fonksiyonlarını oluşturmak için, geliştirilen yöntemler hakkında bilgi verilmiştir.

#### **1.4.7. Yapı oryantasyonunun çok-amaçlı optimizasyonu**

Bu bölümde, SLM prosesinde yapı oryantasyonunun optimizasyon probleminin tanımlanması konusunda genel bir bakış sunulmuştur. Amaç fonksiyonları, değişkenler ve kısıtların tanımlanması ile ilgili yapılan çalışmalar aktarılmıştır. Son olarak yapı oryantasyonunu etkileyen değişkenlerin tanımlanması ve üretilebilir bir yapı oryantasyonunu garanti etmek için seçilen kısıtlar hakkında detaylı bir bilgi verilmiştir.

#### **1.4.8. Yapı oryantasyonunun geometrik doğruluk üzerinde etkilerinin incelenmesi**

Bu bölümde, eklemeli imalat prosesi ile üretilecek bir parçanın üretim sonrasındaki durumu proses simülasyonları yardımıyla incelenmiştir. Parça üzerinde oluşan etkiler yapı oryantasyonu sonucunda oluşan farklı olgular üzerinden değerlendirilmiştir. Son

olarak bu olgular ile üretilen parçanın geometrik doğruluğu ilişkilendirilerek farklı yapı oryantasyonlarında, proses simülasyonuna ihtiyaç duyulmadan, parçanın üretim sonrası durumuna genel bir öngörü sunulmuştur.

#### **1.4.9. Bulguların incelenmesi**

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular incelenmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen tahmin yöntemlerinin avantajları ortaya konmuştur. Çok-amaçlı optimizasyonun tek-amaçlı optimizasyona karşı avantajları incelenmiştir. Geliştirilen karar-verme yöntemi ile farklı yapı oryantasyonları değerlendirilmiştir. Son olarak geliştirilen yöntemin avantajları üzerinde durulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, karmaşık geometrilere sahip gelişmiş tasarımlar ve eklemeli imalat teknolojisinin güncel durumu incelemektedir. Eklemeli imalat teknolojisi karmaşık tasarımların üretimini gerçekleştirmek için yenilikçi bir teknik olarak ön plana çıkmaktadır ve geleneksel imalata göre sağladığı avantajlar nedeniyle tasarım sınırlarının genişletilebilir olduğu öngörülmektedir. Özellikle havacılık ve medikal sektörlerinde işlevsel parçaların üretiminde sıklıkla kullanılan SLM prosesi başta olmak üzere Toz Yatağı Füzyonu (*Powder Bed Fusion*, PBF) proseslerinin güncel durumları tartışılmaktadır. Tezin amacı doğrultusunda, üretim öncesi hazırlık süreçlerinin optimizasyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca optimizasyon ve bu alanda kullanılan temel kavramlara da genel bir bakış sunulmuştur.

### 2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisine Giriş

Üç Boyutlu (*Three Dimensional*, 3D) Baskı (*3D Printing*), katmanlı imalat veya hızlı prototipleme (*Rapid Prototyping*) gibi farklı isimlerle de bilinen eklemeli imalat ISO/ASTM terminoloji standartlarında “bir parçanın, üç boyutlu bir veriden, katman üzerine katman birleştirilmesi ile üretilmesi prosesi” olarak tanımlanmaktadır. ISO 17296-1’e göre eklemeli imalat, tekne fotopolimerizasyon (*Vat Photopolymerization*), malzeme püskürtme (*Material Jetting*), bağlayıcı püskürtme (*Binder Jetting*), PBF, malzeme ekstrüzyonu (*Material Extrusion*), Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (*Direct Energy Deposition*, DED) ve levha laminasyonu (*Sheet Lamination*) olmak üzere yedi başlık altında kategorize edilmiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması temel işleyiş prensiplerine göre yapılmıştır ve kullanılan malzeme tipleri, enerji kaynakları gibi etmenlere bağlı olarak birçok farklı kırıma bölünmüştür. Teknolojinin sürekli olarak güncellenmesi ile bu kırımların sayısında artış görülmektedir. Eklemeli imalat teknolojisinde yaygın olarak polimer, seramik ve metal malzemeler kullanılmaktadır. Ancak eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılacak malzeme çeşitliliği giderek artmakta ve uygulama alanları da genişlemektedir. Farklı kategorilere ait bazı eklemeli imalat prosesleri ve bu proseslerde kullanılan malzemeler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Ayrıca Eriyik Yığıma Modelleme (*Fused Deposition Modeling*, FDM), Lamine Nesne İmalatı (*Laminated Object Manufacturing*, LOM), Seçici Lazer



Sinterleme (*Selective Laser Sintering*, SLS), SLM gibi yöntemler polimer-metal, polimer-seramik, metal-seramik, fiber takviyeli ve partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde de kullanılmaktadır (Todorov vd., 2014).

**Çizelge 2.1.** Eklemeli imalat prosesleri ve kullanılan malzemeler

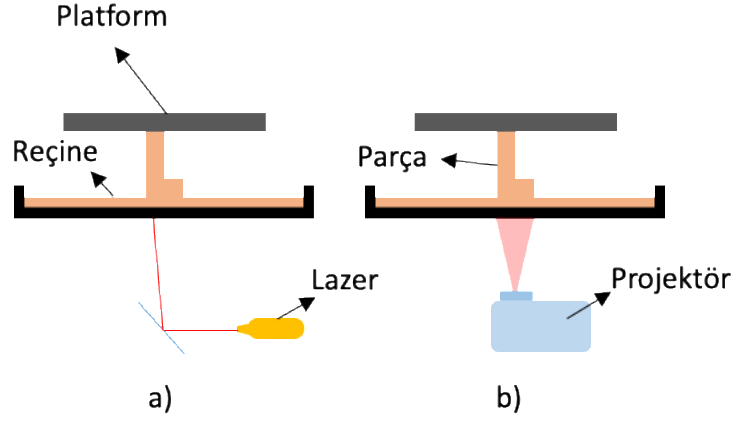
<b>Kategori</b>	<b>Malzeme</b>	<b>Yöntem</b>
PBF	Metal	SLM
		Direkt Metal Lazer Sinterleme ( <i>Direct Metal Laser Sintering</i> , DMLS)
		Elektron Işını ile Ergitme ( <i>Electron Beam Melting</i> , EBM)
	Polimer	SLS
	Seramik	SLS
DED	Metal (Toz)	Direkt Metal Biriktirme ( <i>Direct Metal Deposition</i> )
	Metal (Tel)	Elektron Işını ile Direkt Ergitme ( <i>Electron Beam Direct Melting</i> )
		Tel ve Ark Eklemeli İmalat ( <i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i> )
Malzeme Ekstrüzyonu	Polimer	FDM
Malzeme Püskürtme	Foto Polimer	Polyjet
		Projet
		Ink-jetting
	Mum ( <i>Wax</i> )	Thermojet
		T-Benchtop
Bağlayıcı Püskürtme	Metal	M-Print
	Polimer	3DP
	Seramik	3DP
Tekno Fotopolimerizasyon	Foto-polimer	Stereolithography (SLA)
		Dijital Işık İşleme ( <i>Digital Light Processing</i> , DLP)
	Seramik	CeraFab
		CeramPilot
Levha Laminasyonu	Metal	Ultrasonik Bütünleştirme ( <i>Ultrasonic Consolidation</i> )
	Seramik	LOM

Eklemeli imalat teknolojisinde üretim için izlenmesi gereken adımlar, kesin ve sıralı olmamakla birlikte, genel olarak aşağıdaki gibi listelenebilir.

1. Parçanın CAD tasarımının yapılması
2. CAD modelinin STL dosya tipine dönüştürülmesi
3. Üretim öncesi işlemlerin yapılması, girdi dosyasının oluşturulması ve oluşturulan dosyaların üretim için makineye aktarılması
4. Katman kalınlığının belirlenmesi, malzeme seçilmesi ve parametrelerin belirlenmesi gibi makine ayarlarının yapılması
5. Üretimin yapılması
6. Parçanın tabladan ayrılması
7. Üretim sonrası işlemlerin yapılması (destek yapılarının temizlenmesi, sıcak izostatik presleme vb.)
8. Üretilen parçanın kullanılması

### **2.1.1. Tekne fotopolimerizasyon**

Tekne fotopolimerizasyonu, modelin katman katman oluşturulduğu bir sıvı foto-polimer reçine teknesi kullanır (Gibson vd., 2010b). Gerektiğinde reçineyi kürlemek ve sertleştirmek için ultraviyole ışık kullanırken, bir platform her yeni katman kürlendikten sonra nesneyi aşağı doğru hareket ettirir. Üretim tamamlandıktan sonra reçine dolu hazne boşaltılarak üretilen parça çıkartılır. Bu üretim yönteminde katman kalınlığı 0,025-0,5 mm aralığında değişmektedir (Chua vd., 2010). Bu kategoride SLA ve DLP prosesleri sıklıkla tercih edilmektedir. DLP prosesinin ve SLA prosesinin temel çalışma prensibi oldukça benzerdir. İki yöntem arasındaki temel fark, DLP prosesinde bir projektör tarafından ultraviyole ışık ile katmanlar sertleştirilirken, SLA prosesinde ise lazer kaynağı kullanılmasıdır (Şekil 2.1). DLP prosesinde üretilmek istenen parçanın ilgili üretim adımındaki kesit alanı bir bütün olarak yansıtılarak sertleştirme işlemi gerçekleştirildiği için büyük parçalarda üretim oldukça hızlıdır. SLA prosesinde ise lazerin tüm kesit alanını taraması gerekmektedir. Bu nedenle SLA prosesi, DLP prosesine göre daha yavaş kalmaktadır. Ancak SLA yöntemi kullanılarak geliştirilen yazıcıların tabla boyutu DLP yöntemine göre oldukça büyüktür.

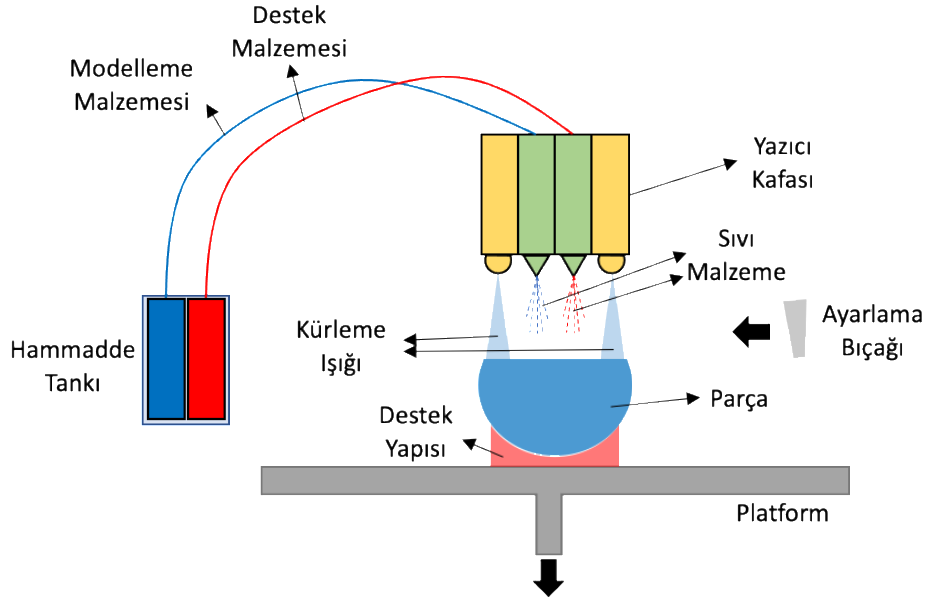


**Şekil 2.1.** a) SLA prosesi ve b) DLP prosesinin şematik gösterimi

Bu yöntem ile üretilen parçalarda anizotropi görülmez. Ancak SLA ve DLP ile üretilen parçalar, reçinenin zamanla ultraviyole etki altında bozulmasına karşı hassastır. Üretimden sonra uygulanan kaplamalar bu etkinin azaltılmasına yardımcı olur. SLA ve DLP prosesleri ile parça üretebilmek için destek yapıları gereklidir. Parçanın doğruluğu önem arz ediyorsa, destek yapılarının konumu ve geometrisini optimize etmek oldukça önemlidir.

### 2.1.2. Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme prosesleri iki boyutlu yaygın yazıcılarda kullanılan teknoloji ile oldukça benzerdir. Malzeme serilmeden önce, baskı için en uygun viskozite değerine sahip olduğu sıcaklık aralığına ısıtılır. Mürekkep püskürtmeli yazıcılarda bulunan yazıcı kafasına benzer bir düzenek ultraviyole ışık altında sertleşen, ışığa duyarlı üretim malzemesini damlacıklar halinde Şekil 2.2’de görüldüğü gibi katman üzerinde dağıtır (J.-C. Wang vd., 2019). Birçok malzeme püskürtme yöntemi, Talep Üzerine Bırakma (*Drop-on-Demand*, DOD) yaklaşımını kullanarak, katman üzerine viskoz malzemeyi sermektedir. Yazıcı kafasında bulunan bir ultraviyole ışık kaynağı, katman üzerinde biriktirilen malzemeyi kürleştirerek katı hale getirir ve yeni katman oluşturulmuş olur (Gülcan vd., 2021). Daha sonra ayarlama bıçağı üretilen katmanın üzerinden geçerek gerekli düzeltmeleri yapar. Platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek yeni katmanın üretilmesi sağlanır. Bu işlem parça tamamen üretilinceye kadar devam eder.



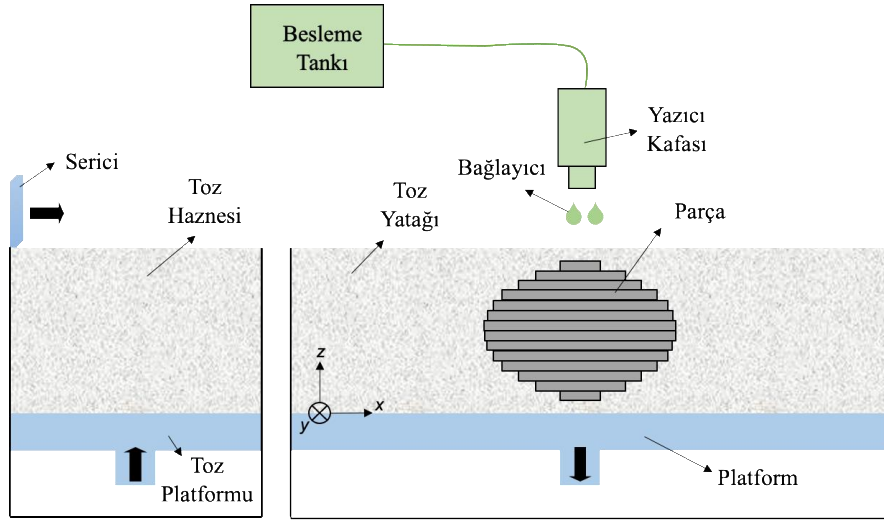
**Şekil 2.2.** Bir malzeme püskürtme prosesi olan Polyjet teknolojisinin şematik gösterimi

Malzeme püskürtme teknolojisi ile çok-malzemeli ve çok-renkli bir baskı alınabilmesi mümkündür. Böylece üretilmek istenen parçanın farklı bölümleri farklı malzeme veya renkte basılabilir (Sireesha vd., 2018). Bu duruma örnek olarak, sert bir dış yüzeyi olmasına karşın yumuşak bir iç yapıya sahip numuneler gösterilebilir. Malzeme püskürtme yöntemi ile enjeksiyon kalıplamaya benzer yüzey kalitesine ve çok yüksek boyutsal hassasiyete sahip parçalar üretilebilir (Gülcan vd., 2021). Birçok diğer eklemeli imalat prosesinin aksine malzeme püskürtme yöntemi ile üretilen parçalar homojen mekanik ve termal özelliklere sahip olmaktadır. Ancak bu proses ile üretilen parçalar düşük mekanik özelliklerinden dolayı çoğu zaman işlevsel olmayan prototip parçalar üretmek için kullanılmaktadır.

Malzeme püskürtme yönteminde destek yapıları gereklidir. Ancak destek yapıları, basınçlı su kullanarak veya ultrasonik banyoya daldırılarak kolayca temizlenebilen ikincil bir çözünebilir malzeme kullanılarak oluşturulmaktadır (O'Neill vd., 2017). Bu nedenle, diğer eklemeli imalat proseslerinin aksine malzeme püskürtme yöntemi ile üretilen parçalar destek yapıları temizlendikten sonra bile oldukça pürüzsüz yüzeylere sahip olmaktadır.

### 2.1.3. Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme yönteminde, serici yardımıyla oluşturulan toz malzeme katmanı üzerindeki seçilmiş alana, yapıştırıcının biriktirilmesi ile üretim gerçekleştirilir (J.-C. Wang vd., 2019). Seçici olarak bağlayıcı uygulanan alandaki toz malzemeler, birbirine bağlanarak, ilgili adımdaki parça katmanını oluşturur (Şekil 2.3). Bağlayıcı püskürtme yönteminde yaygın olarak granüler formdaki metal, polimer ve seramik malzemeler kullanılmaktadır (Leary, 2020a). Bu yöntemde malzemeye bağlı olarak bir son işlem gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Özellikle metal parçaların üretiminde sinterleme ve farklı ısıl işlemler gibi bazı proses sonrası işlemlerin yapılması kaçınılmazdır (Yi Zhang vd., 2018).



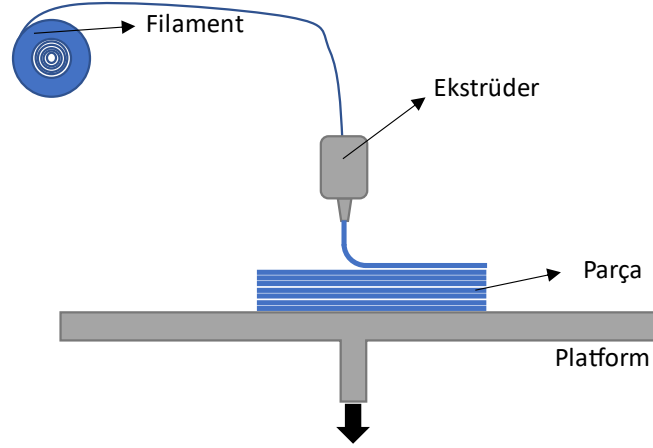
Şekil 2.3. Bağlayıcı püskürtme yönteminin şematik gösterimi

Bu yöntemin en büyük avantajı üretim sırasındaki bağlanma işlemlerinin oda sıcaklığında gerçekleşiyor olmasıdır. Bu nedenle, FDM, SLS, SLM gibi proseslerde ortaya çıkan termal çarpılmalar bu processte görülmemektedir. Bu durum, diğer avantajlarının yanında bir avantaj daha sağlamaktadır. Diğer proseslerde ağırlık merkezinin dengelenmesi için kullanılan destek yapılarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Toz yatak halihazırda bu görevi yerine getirmektedir. Ayrıca termal çarpılmaların olmaması da destek yapısı ihtiyacını tamamen ortadan kaldırmaktadır (Leary, 2020b). Bu yöntem ile üretilen parçalardaki neredeyse tüm geometrik hatalar proses sonrası işlemlerden kaynaklanmaktadır.

Bağlayıcı püskürtme teknolojisi metal parçaların üretimi düşünüldüğünde SLM prosesine göre oldukça ekonomiktir. Ayrıca destek yapısı ihtiyacı da bulunmadığından oldukça karmaşık parçaların üretimi mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntemin ana dezavantajı, üretilen parçaların fonksiyonel olarak kullanılabilmesi için gereken mekanik özellikleri sağlayamamasıdır. Metal bağlayıcı püskürtme parçaları, gözenekli yapılarından dolayı SLM ile üretilen parçalardan daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca malzeme yelpazesi diğer eklemeli imalat proseslerine göre oldukça sınırlıdır.

#### **2.1.4. Malzeme ekstrüzyonu**

Malzeme ekstrüzyonu prosesinde, ekstrüderde eritilen malzemenin önceden belirlenmiş yolda tablanın veya bir önceki katmanın üzerinde biriktirilmesiyle üretim gerçekleştirilir. Kullanılan malzemeler genellikle termoplastik polimerlerdir ve bu malzemeler genellikle filament ya da granül halindedir. Endüstrinin yanında bireysel olarak oldukça yaygın kullanılması da teknolojiyi dünyada en çok tercih edilen eklemeli imalat prosesi konumuna getirmiştir (J.-C. Wang vd., 2019). Şekil 2.4'te şematik çalışma prensibi gösterilen FDM prosesinde hammadde beslemek için kullanılan rulodan ekstrüdere filament bağlantısı sağlanır. Ekstrüderin uç kısmında bulunan nozül, filamenti gerekli akışkanlığa ulaştırdığında, genellikle içerisinde bulunan bir sistem yardımıyla sürekli olarak dışarıya çıkmaya zorlar. Bu ekstrüder tablaya paralel düzlemde hareket etmesine izin veren bir sisteme bağlanmıştır. Eritilmiş malzeme ince şeritler halinde nozülden çıkmaya zorlanır ve önceden belirlenmiş yolları takip ederek ilgili katmandaki üretimi bitirir. Bu adım kâğıt üzerine konturu çizilmiş bir alanın içini kalem ile doldurmaya benzetilebilir. Daha sonra platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek yeni katmanın üretilmesine olanak sağlar. Bazı yazıcı konfigürasyonlarında tabla sabittir ve üretim doğrultusundaki hareketi de ekstrüder gerçekleştirir. Bu işlem üretim tamamlanıncaya kadar gerçekleştirilir. Ayrıca farklı yazıcı konfigürasyonlarında bir ekstrüder üzerinde birden fazla nozül ya da birden fazla ekstrüder bulunabilmektedir. Böylece farklı malzemeler kullanılarak üretim yapılabilir. FDM prosesi birçok araştırma çalışmasında sıklıkla kullanılmaktadır ve çok hızlı biçimde gelişmeye devam etmektedir. Polimer ve plastik gibi malzemelerin yanında kompozit malzemeler ile de birçok uygulama gerçekleştirilmiştir.



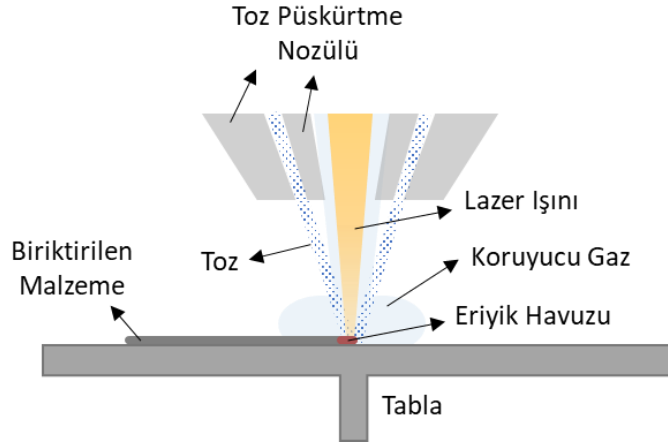
**Şekil 2.4.** FDM prosesinin şematik gösterimi

Bazı FDM tipi yazıcılarda ekstrüder üzerinde fan da yer almaktadır. Böylece, katman üzerine bırakılan malzemenin şeklini kaybetmemesi için bir soğutma işlemi de gerçekleştirilmiş olur. Çarpılma, FDM prosesindeki en yaygın sorunlardan biridir. Nozülden çıkmaya zorlanan sıcak malzeme soğuyarak katılaştığı sırada boyutları küçülür. Üretilen parçanın farklı bölgeleri, malzeme yoğunluğuna bağlı olarak, farklı hızlarda soğur ve boyutları da farklı hızlarda değişir. Bu soğuma farkı, üretilen katmanın, bir önceki katmanı kendine doğru çekerek yukarı bükülmesine neden olur. Böylece sürekli olarak bir iç gerilme birikmesine yol açar. Bu sorun farklı yazıcı konfigürasyonlarında tablanın ve/veya ortam sıcaklığının kontrol edilmesi ile önlenabilmektedir. Ayrıca üretimin başladığı tablada oluşturulan ilk katman için fazladan konturlar eklenerek yapışmanın daha iyi olması sağlanabilir. Böylelikle biriken iç gerilmeler, parça ile tabla arasındaki bağlantıyı koparamamaktadır. Bu üretim yönteminde çalışma prensibinden dolayı üretilen parça anizotropik mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Ayrıca katmanlar arasında çentik etkisi oluşmaktadır.

FDM üretim yönteminde sarkan yüzeyleri üretebilmek için destek yapıları gereklidir. Erimiş malzemenin havada biriktirilmesi mümkün değildir. Ayrıca üretilmek istenen parçanın yapı oryantasyonu sebebiyle üretim esnasında ağırlık merkezi kayabilir ve parça yıkılabilir. Destek yapıları FDM prosesinde bu nedenle de kullanılmaktadır.

### 2.1.5. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) prosesi

DED teknolojisinde, bir eriyik havuzu oluşturmak için lazer, elektron ışını veya gaz-tungsten arkı gibi bir ısı kaynağı kullanılır ve eriyik havuzuna toz veya tel biçiminde dolgu malzemelerinin eklenmesi ile üretim gerçekleştirilir (Dutta, 2020). DED prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Toz kullanılarak yapılan üretimde, tel kullanılarak yapılan üretime kıyasla daha düşük birikme verimliliği görülmektedir. Çünkü toplam tozun sadece bir kısmı eritilir ve alt tabakaya bağlanır (Sing vd., 2020). Enerji kaynağı olarak ark ve lazer kullanılan DED makinelerinde genellikle nozüllerden gelen tozla birlikte soy gaz üflenir. Elektron ışını kullanan sistemlerde ise vakum gereklidir (Bae vd., 2018).



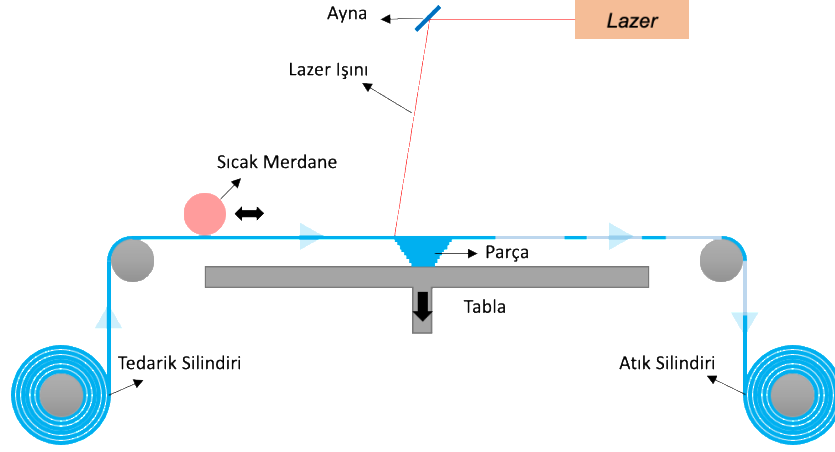
Şekil 2.5. DED prosesinin şematik gösterimi

### 2.1.6. Lamine nesne imalatı (LOM) prosesi

LOM prosesinde Şekil 2.6'da görüldüğü üzere tabaka bir tedarik silindirinden ileri itilmektedir. Yeterli miktarda itilen tabakayı bir alt katman ile birleştirmek için ısıtılan merdane basınç uygulayarak tabakanın üzerinden geçmektedir. Bir alt katman ile bağlantı sağlanan tabaka bir lazer yardımıyla kesilerek parçanın ilgili yükseklikteki üretimi tamamlanmaktadır. Parçanın ilgili katman yüksekliğindeki kesiti çıkarıldıktan sonra geriye kalan atık malzeme başka bir silindire sarılarak toplanır. Her bir katman üretimi tamamlandıktan sonra tabla katman kalınlığı kadar hareket ettirilerek yeni üretim adımı başlamaktadır. İstenen geometri elde edilene kadar bu işlemler tekrar etmektedir. Bu proses ile rulo haline getirilebilen plastik ve metal gibi çeşitli malzemeler



kullanılabilmektedir. Tabakanın kalınlığı, merdiven etkisinden dolayı, üretilen parçanın yüzey pürüzlülüğüne direkt olarak etki etmektedir.



Şekil 2.6. LOM prosesinin şematik gösterimi

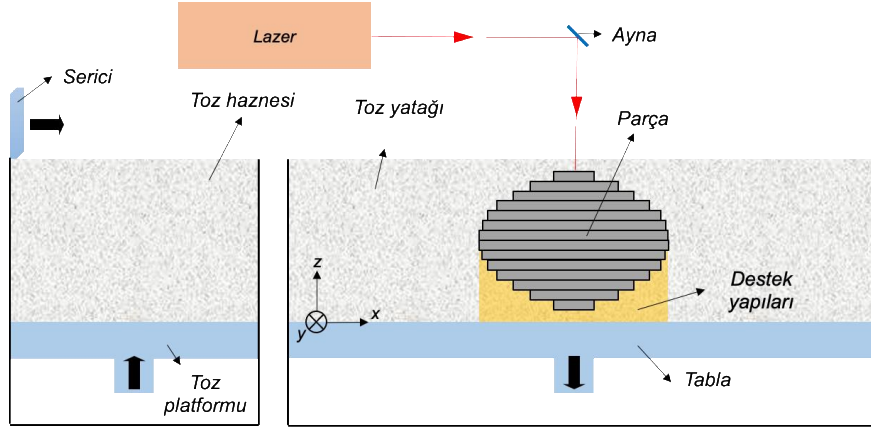
### 2.1.7. Toz yatağı füzyonu (PBF) prosesleri

PBF yöntemleri, hazne içerisine serilen tozu eritmek ve kaynaştırmak için bir lazer veya elektron ışını kullanır. Toz partiküllerinin birbiriyle bağlantısı dört mekanizma ile gerçekleştirilir (Kruth vd., 2005). Bu dört mekanizma katı-hal sinterleme, kimyasal bağlama, sıvı-fazlı sinterleme (kısmi eritme) ve tam-hal erime olarak sıralanabilir. PBF teknolojisi SLM, DMLS, EBM ve SLS gibi yaygın kullanılan eklemeli imalat tekniklerini içermektedir.

SLS, DMLS ve SLM proseslerinin çalışma prensipleri oldukça benzerdir ve Şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmiştir. SLS prosesinde lazer ışını partiküller ile etkileşime girerek parça üretmek için katı-hal sinterleme mekanizmasını kullanır. SLS prosesinde genellikle plastik ve seramik malzemelerin üretimi yapılmaktadır. Ancak bu yöntemle yüksek performanslı fonksiyonel ürünlere erişmek mümkün değildir.

SLM prosesinde partiküller bir lazer yardımıyla tam-hal erime mekanizması ile bir eriyik havuzu oluşturularak birleştirilir. SLM prosesinde bir serici yardımıyla istenen kalınlıkta toz malzeme, üretim yapılacak tablanın üzerine serilmektedir. Serilen tozun katman kalınlığı genellikle 20-100 µm aralığındadır (Nematollahi vd., 2019). Daha sonra lazer ışını, parçanın ilgili yükseklikteki kesit alanını tarayarak birleştirmektedir. Tabla aşağı

hareket ettirilerek yeni bir katman toz malzemenin serilmesi ve lazer ışını aracılığıyla katılaştırılarak bir önceki katman ile bağlantısının sağlanması işlemi parçanın tamamı üretilene kadar devam etmektedir.



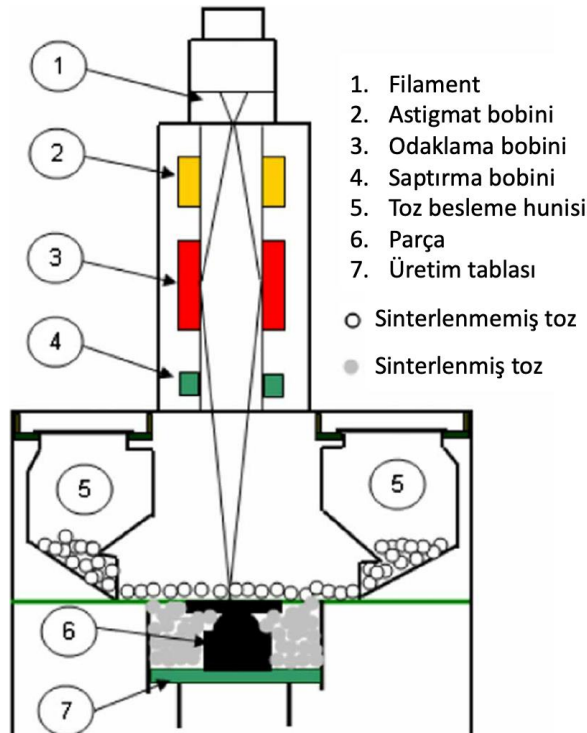
**Şekil 2.7.** SLM prosesinin şematik gösterimi (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

SLM prosesinde lazerin gücü, tarama hızı, tarama stratejisi ve katman kalınlığı en önemli üretim parametreleri olarak gösterilebilir. Alüminyum, titanyum, bakır, krom, kobalt krom, paslanmaz çelik, takım çeliği ve süper alaşımlar gibi çok çeşitli malzemeler ile üretim yapılabilmektedir (Song vd., 2020). Bu teknolojiye proses parametrelerinin her bir malzeme için optimize edilmesi önemlidir. Çünkü proses parametreleri malzemenin mikro yapısını, yoğunluğunu, mekanik özelliklerini, yüzey kalitesini ve geometrik doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir (Prashanth vd., 2017; Suryawanshi vd., 2016). SLM prosesinde yüksek sıcaklıklarda reaktif malzemeler ile üretim yapıldığı için genellikle bir soy gazla doldurulmuş kapalı bir bölümde işlem gerçekleştirilir (Gokuldoss vd., 2017).

SLM prosesinde çok çeşitli malzeme yelpazesi ile yüksek doğrulukta ve mekanik özelliklerde işlevsel parçaların üretilmesi, prosesin havacılık ve medikal endüstrilerinde kullanılmasında büyük avantaj sağlamaktadır. Ancak sağladığı avantajların yanında bazı dezavantajlar da mevcuttur. Bu teknolojiyi kullanan cihazların ilk yatırım ve proses maliyeti oldukça yüksektir. Ayrıca üretim sırasında meydana gelen sürekli ısınma ve soğuma durumu, parçada çarpılmalara ve kalıntı gerilmelere neden olmaktadır. Bu sorunları en aza indirmek ve sarkan yüzeylerin üretilmesini sağlamak için destek

yapıları kullanılmaktadır. Ancak destek yapılarının üretimi için de oldukça kıymetli olan metal toz malzeme kullanılmaktadır. Bu da prosesin maliyetine olumsuz etki etmektedir.

EBM, metal tozundan tamamen yoğun 3D nesnelere oluşturmak için bilgisayar kontrollü bir elektron tabancası kullanan PBF teknolojilerinden biridir. Diğer birçok eklemeli imalat prosesi gibi, EBM’de de nesnelere katman katman oluşturulur (Nasr vd., 2014). EBM teknolojisi ilk olarak yaklaşık olarak 1997 yılında İsveç’teki Arcam AB şirketi tarafından ticarileştirilmiştir (Murr & Gaytan, 2014). Bu teknolojinin temel çalışma prensibi, vakum koşulları altında bir elektron ışını ile ayrı toz katmanlarının seçici olarak eritilmesiyle yapıların üretilmesidir (Heinl vd., 2008). Eritme işlemi için kullanılan enerji kaynağı, tungsten filamentinden yayılan bir elektron ışınıdır. Işının konumu ve çapı, iki manyetik bobin tarafından kontrol edilir (Galarraga vd., 2016). EBM, SLM ile benzer bir çalışma sürecine sahiptir. Ancak, SLM prosesindeki lazer ışını yerine, EBM prosesinde bir elektron ışını ısı kaynağı görevi görür (L.-C. Zhang vd., 2020). EBM prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2.8.** EBM prosesinin şematik gösterimi (Syam ve ark. 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

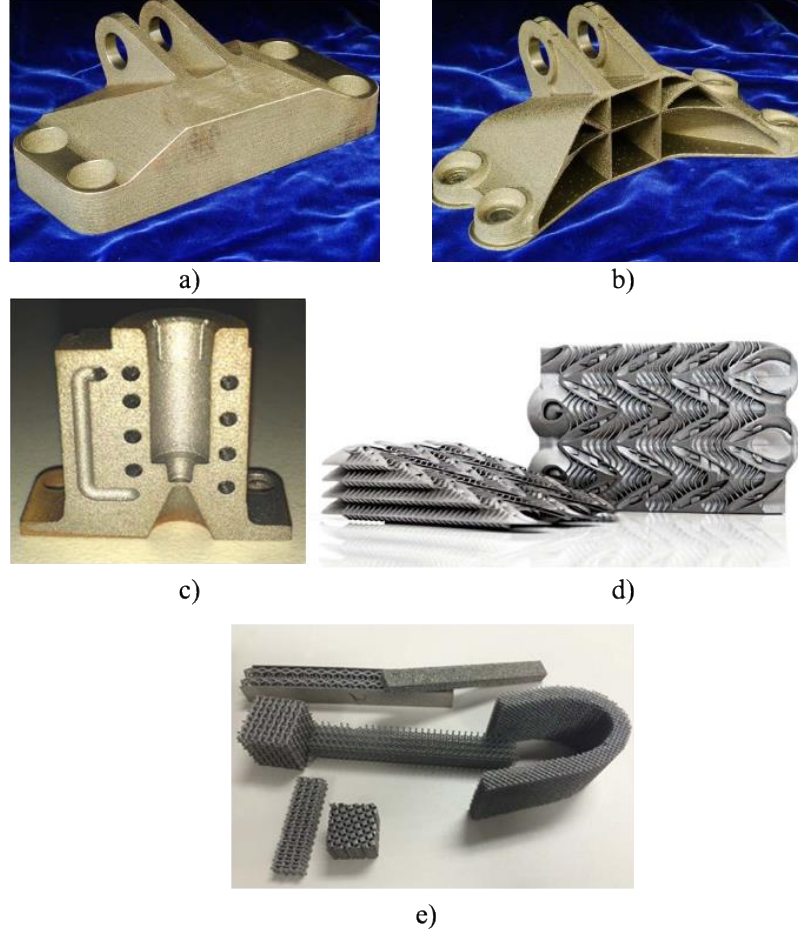
## 2.2. Eklemeli İmalat ve Geleneksel Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Günümüzde mühendislik yapılarının optimizasyonu rekabet gücünü artırmak için gereklilik haline gelmiştir. Optimize edilen mühendislik yapıları genelde karmaşık geometrilere sahip olmaktadır ve geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi mümkün olmamaktadır. Bu karmaşık geometriye sahip parçaların eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca birden fazla bileşenin birleştirilerek oluşturulduğu montajlarda yekpare üretim yapılarak bileşen parça sayısının azaltılmasıyla da ağırlık avantajı sağlanabilir. Eklemeli imalat teknolojisi, bu avantajları ve geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla sağladığı daha başka birçok avantaj nedeniyle geleceğin imalat yöntemi olarak görülmektedir ve büyük ilgi görmektedir.

Eklemeli imalat yöntemleri, plastik malzemeler ile, prototip üretim süreçlerini kısaltmak için kullanılmaya başlanmıştır. Ancak metalik malzemelerin yüksek doğrulukta ve yüksek mukavemetli üretiminin gerçekleştirilmesiyle işlevsel parçaların üretiminde de kullanılabilirliğinin önü açılmıştır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretimi çok zor olan ve hatta mümkün olmayan metal karmaşık parçaların üretilmesi için metalik eklemeli imalat teknolojilerinin kullanılması gereksinimi oluşmaktadır. Özellikle havacılık, savunma ve medikal sektöründe firmalar ve ülkeler rakiplerine karşı avantaj sağlamak için, eklemeli imalat teknolojisini tercih etmektedir. Bu nedenle, PBF teknolojisinin satışı 2019 yılında, dünya genelinde, %40'tan fazla artmıştır (Weber vd., 2020).

Amerikan Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (*American Airforce Research Laboratory*, ARFL) tarafından yayınlanan raporda beş karmaşıklık grubu tanımlanmıştır (Todorov vd., 2014). Birinci grup, talaşlı imalat ile bir veya iki basit operasyonda üretilebilecek ve incelenebilecek basit parçaları temsil etmektedir (Şekil 2.9a). İkinci grup, geleneksel yöntemler kullanılarak, karmaşık işlemler sonucunda elde edilebilecek optimize edilmiş parçaları temsil etmektedir (Şekil 2.9b). Üçüncü grup, talaşlı imalat yöntemleri ile tek parça olarak üretilmeyen, üretilmesi için bölümlere ayrılması ve birkaç montaj aşaması gerektiren parçaları temsil etmektedir (Şekil 2.9c). Dördüncü grup, talaşlı imalat ile üretilmesi mümkün olmayan ve eklemeli imalat prosesleri için tasarlanmış parçaları temsil etmektedir (Şekil 2.9d). Beşinci ve son grup ise eklemeli

imalat teknolojisi haricinde üretimi mümkün olmayan latis (*lattice*) yapılarını temsil etmektedir (Şekil 2.9e).



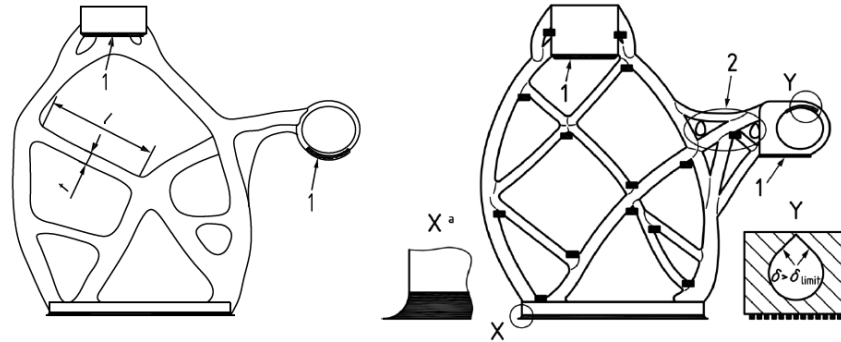
**Şekil 2.9.** ARFL'e göre a) birinci grubu temsil eden, b) ikinci grubu temsil eden, c) üçüncü grubu temsil eden, d) dördüncü grubu temsil eden ve e) beşinci grubu temsil eden parça örnekleri (Todorov ve ark. 2014'ten değiştirilerek alınmıştır)

### 2.3. Eklemeli İmalat Prosesinde Aşılması Gereken Zorluklar

Oropallo ve Piegl (2016) eklemeli imalat prosesindeki kısıtları ve aşılması gereken zorlukları inceledikleri bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışma sonucunda aşılması gereken zorlukları 10 başlık altında toplamışlardır. Bu bölümde ilgili çalışma temel alınarak aşılması gereken zorluklar konusunda detaylı bir araştırma yapılarak sunulmuştur.

### 2.3.1. Parçanın optimizasyonu

Eklemeli imalat prosesi ile, topoloji optimizasyonu uygulanmış karmaşık yapıların veya kafes yapılarının üretilmesi mümkün olmaktadır. Topoloji optimizasyon problemlerinde genellikle bir tasarım uzayı vardır ve bu hacimdeki belirli kısımlar çıkarılarak belirlenen amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon gerçekleştirilir. Ancak tasarım uzayının optimizasyon sırasında nasıl doldurulduğu, parçanın üretilebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Optimizasyon sonucunun parçada elde edilecek ağırlık kazancının yanı sıra üretilmesi için harcanan enerji miktarını, kullanılan malzeme miktarını ve toplamda üretim maliyetini etkileyeceği unutulmamalıdır. Yani kütle ve mukavemet gibi isterler için en uygun tasarım bulunsa bile atık malzemelerin tasarımın içerisinde hapis kalması, bazı geometrik unsurların istenen doğrulukta olmaması gibi nedenlerle eklemeli imalat prosesi ile üretilmeyebilir. Bu sorunları çözmek için temel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, eklemeli imalat ile üretilbilecek geometrik unsurlar ile boşaltma işleminin yapılmasıdır. Şekil 2.10'da Y detay görüntüsü ile gösterilen damla şekli bu yönteme örnek olarak gösterilebilir. İkincisi ise optimizasyon algoritmalarına eklemeli imalat ile üretim için bazı kısıtlar eklenmesidir. Şekil 2.10'da optimizasyon sonucu elde edilen tasarımdaki bazı dikmeler (*struts*) üretilebilir açı sınırını aşmaktadır. Bu nedenle PBF prosesi ile üretilmeye uygun olması için yapılan ikinci tasarımda bu yapılar sarkma açısını aşmayacak şekilde revize edilmişlerdir.



**Şekil 2.10.** Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen ilk tasarım (sol) ve PBF prosesi için üretim kısıtları gözetilerek yapılan tasarım (sağ) (ISO-ASTM 52911-1)

Hücreli yapılar genel olarak latisler, bal peteği yapıları, kafesler ve belirli bir şekle sahip tekrarlanabilir diğer elemanlar olarak tanımlanabilir. Günümüzde hücreli yapıların geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu hücreli yapıların gerekli mukavemeti

sağlaması ve aynı zamanda hafif olması için şekilleri ve boyutları optimize edilmiştir. Bu çalışmalar ileri taşınarak bazı bölgelerde tekrarlanmayan, çalışma koşullarına uygun farklı yönelimlerde ve farklı tiplerde kafes yapıları oluşturularak hücresel yapılar kavramının dışına çıkmıştır. Parçanın boyutlarına ve geometrisine bağlı olarak bu yapılar binlerce hatta on binlerce sayıda olabilmektedir. Mevcut CAD sistemleri çok yüksek sayılarda olan bu elemanların modelleme işlemini gerçekleştirmede bazı sorunlar yaşamaktadır. Bu sorun özellikle eklemeli imalat ile üretim gerçekleştirmek için kullanılan STL dosya tipinde daha belirgin hale gelmektedir. Bununla birlikte eklemeli imalatta üretimin başladığı tablaya paralel olan bazı kafes yapısı elemanlarının, üretilebilir köprü mesafesini aşması durumunda, destek yapısı olmadan üretilmesinin mümkün olmamasıdır. Bu kafes yapıları destek yapısı ile üretilse bile küçük ve tekrar eden yapısından dolayı destek yapılarının kafes yapılarının içerisinde temizlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu sorun tablaya paralel dikmelerin kullanılmaması ile çözülebilir. Ancak parça geometrisine uygun olarak yerleştirilen kafes yapıları sağladığı büyük avantajların yanında bu nedenle üretilebilir olamayabilirler.

### **2.3.2. Eklemeli imalat için tasarım**

Eklemeli imalat ile talaşlı ve şekillendirmeli imalat gibi geleneksel üretim yöntemleriyle üretilemeyen parçaların üretilebilmesinin yanı sıra montaj edilerek birleştirilmiş birçok parça da işlevsel olarak tek seferde üretilebilmektedir. Ancak bir parçanın üretiminde eklemeli imalat yönteminin seçilebilmesi için fayda/zarar analizi yapılmalıdır. Toplum üzerinde eklemeli imalat ile üretimin daha iyi olduğu gibi bir algı oluşmuştur. Ancak geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmek için tasarlanan bazı geometrilerin eklemeli imalat ile üretilmesi hiçbir avantaj sağlamamasının yanında büyük bir mali yük getirmektedir. Eklemeli imalatın benzersiz özelliklerinden yararlanmak için tasarım sürecinin geleneksel yaklaşımlardan bağımsız yeniden düşünülmesi ve bu tür bir tasarıma uyum sağlamak için yeni araçların yaratılması gerekmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, geometrik karmaşıklık ve çok sayıda unsur üzerindeki işlemler CAD yazılımında bir darboğazdır (Gibson vd., 2010a).

Eklemeli imalat için parça tasarlarken prosesin limitleri göz önünde bulundurulmalıdır. Günümüzde eklemeli imalat ile üretim yapılabilen malzemeler sınırlı sayıdadır. Ayrıca

bu malzemeler ile üretilen parçaların çalışma koşulları altındaki davranışı ve boyutları seçilen eklemeli imalat prosesi ile direkt olarak bağlantılıdır. Eklemeli imalata uygun tasarım yapmak için çok fazla konu göz önünde bulundurulmalıdır ve tecrübe gereksinimi oldukça yüksektir. Parça her ne kadar anizotropi göz önünde bulundurularak tasarlansa da ortaya çıkan tasarım, ilgili yapı oryantasyonundan ötürü üretilemeyebilir. Ya da üretilen parça üzerinde çarpılma ve büzülme gibi yaygın görülen problemler ortaya çıkabilir. Üretilmek istenen parçanın sarkan yüzeylerinde destek yapıları kullanmak gerekmektedir. İlgili yapı oryantasyonunda çok fazla sarkan yüzey bulunması durumunda kullanılan yüksek hacimdeki destek yapılarını temizlemek için üretim sonrası büyük bir işçilik gerektirebilir. Destek yapıları parça yüzeyinden temizlendikten sonra yüzey kalitesi önemli ölçüde kötü etkilenmektedir. Hatta bazı destek yapıları konumundan dolayı temizlenemeyebilir. Bazı durumlarda da destek yapıları temizlenirken parçada hasar da oluşabilir.

### **2.3.3. Üretim öncesi ve sonrası işlemler**

Eklemeli imalat prosesinin tanımını yaparken her ne kadar CAD verisinden direkt olarak üretilebilmesi vurgulansa da üretim öncesinde birçok işlem yapmak gereklidir. Üretim sonrasında da destek yapılarının temizlenmesi, yüzey kalitesinin artırılması ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi için talaş kaldırma ve ısıl işlem gibi birtakım uygulamalar gerekebilmektedir.

STL dosya formatı neredeyse tüm eklemeli imalat proseslerinde standart olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, ilk adım olarak tasarlanan CAD modeli STL dosya formatına dönüştürülür. STL dosya formatında parçanın geometrisi yalnızca yüzey olacak şekilde düzlemsel üçgenler ile yaklaşık olarak temsil edilir. Son on yıldır STL dosya formatına alternatifler geliştirilse de bu format kullanılmaya devam etmiştir (Navangul vd., 2013). STL dosya formatında parça düzlemsel üçgenlerle temsil edildiği için özellikle eğri unsurlarda geometrik hatalara sebep olmaktadır. Ayrıca STL dosya tipi oluşturulurken eksik veya yanlış yönlenmiş üçgenler sorunlara sebep olabilmektedir. Bu üçgenlerin bir hacim oluşturabilmesi için kapalı olması gerekmektedir. Bu nedenle eksik veya yanlış yönlenmiş üçgenler üretim öncesi işlemler sırasında veya üretim sırasında hatalara neden olabilmektedir. STL dosyasında yalnızca üçgenleri temsil eden üç



noktanın üç koordinatı ve her üçgen için üç yüzey normali bileşeni bulunmaktadır. Harici bir veri içermediğinden üretim ve sınır koşulları gibi bilgileri aktarmak mümkün değildir (Navangul vd., 2013).

Üretim öncesi hazırlık aşaması üretimin adım adım planladığı kısımdır. Genel olarak üretim öncesi aşama yapı oryantasyonun belirlenmesi, gerekiyse destek yapısı oluşturulması, modelin dilimlenmesi ve tarama yollarının belirlenmesi olarak dörde ayrılabilir (Ahn vd., 2007). Parçanın kalite gereksinimlerini karşılaması için bu aşama oldukça kritiktir. Yapı oryantasyonu ve dilimleme işlemleri ayrı bir başlık altında inceleneceği için bu bölümde destek yapılarının oluşturulması ve takım yolunun belirlenmesi üzerinde durulacaktır. Destek yapılarının oluşturulması ve optimizasyonu konusunda ilerleyen kısımlarda detaylı bir literatür bölümü de mevcuttur.

Destek yapılarının amacı üretimin başarıyla gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Farklı üretim proseslerinde destek yapıları farklı görevleri üstlenirler. Ancak SLS gibi bazı proseslerde destek yapısına ihtiyaç duyulmamaktadır. Destek yapılarının gerekli olması durumunda, bu yapıların üretilmesi için de hammadde kullanılmaktadır. Bu yapılarının üretilmesi için harcanan zaman da üretim süresini artırmaktadır. SLM gibi proseslerde toz malzemeler oldukça değerli olduğu için bu sorun daha önemli hale gelmektedir. Bazı eklemeli imalat proseslerinde ise destek yapıları daha değersiz bir malzemedен üretilmektedir. Böylece oluşan kayıp minimize edilmiştir. Üretim sonrasında bu destek yapılarının parçadan temizlenmesi gerektiği için fazladan işçilik meydana gelmektedir. Bununla birlikte destek yapıları parça üzerinden temizlendikten sonra destek yapısı ile temas eden yüzeylerin kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Bazı proseslerde ise destek yapılarının üretilmesinde çözünebilir malzemeler kullanılmaktadır. Böylece yüzey pürüzlüğüne etkisi ve oluşacak fazladan işçiliğin önüne geçilmiştir. Ancak işlevsel metalik parçaların üretildiği yüksek maliyetli proseslerde bu yöntem uygulanamamaktadır.

Üretim yolu parça dilimlendikten sonra belirlenir. Tarama stratejisi prosese bağlı olarak malzemenin yığıldığı, tarandığı, sinterlendiği, eritildiği veya üretim için nasıl bir işlem gerekiyorsa bunun için izlenecek yolun belirlenmesidir. Bu yol parçanın nasıl üretilceğinin önceden belirlenmesidir ve parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerine

büyük oranda etki etmektedir. Ayrıca tarama hızı da parçanın kalitesine etki etmektedir. Literatürde birçok tarama stratejisi geliştirilmiştir. Ancak farklı durumlarda farklı tarama stratejilerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle optimum tarama yolu ve tarama hızının seçilmesi bilgi birikimi gerektirmektedir.

Parça üretildikten sonra parçayı tasarlandığı hale getirmek için bazı üretim sonrası işlemler gerekebilir. Eklemeli imalat prosesinde parça katman üzerine katman ekleyerek üretildiği için merdiven etkisi (*staircase effect*) oluşmaktadır. Bu etki özellikle eğimli veya açılı yüzeylerde daha belirgin olmaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü talaşlı imalat ile üretilen parçalar kadar iyi olmamaktadır. Ayrıca parça üzerinden ayrılan destek yapıları da yüzey kalitesini kötü etkilemektedir. Destek yapılarının parçadan temizlenmesi sırasında parça hasar da alabilmektedir. Bu nedenle parçanın yüzey kalitesini artırmak için birçok yöntem kullanılmaktadır (Ahn vd., 2007). En basit ve en ucuz yöntem üretilen parçanın zımparalanmasıdır. Ancak farklı malzemeler için farklı ileri yöntemler de kullanılmaktadır. Ancak bu süreçler gereken işçiliği, üretim süresini ve maliyetini artırmaktadır.

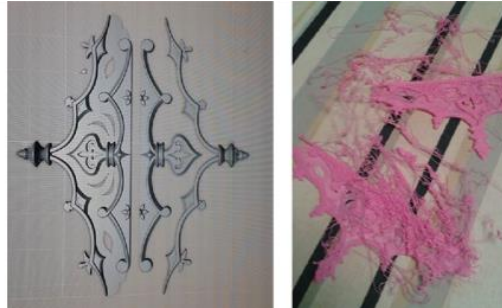
#### **2.3.4. Üretim yöntemleri**

ISO/ASTM 52900'a göre eklemeli imalat yedi ana kategori altında sınıflandırılmıştır. Ancak teknoloji çok hızlı gelişmektedir ve proseslerin sürekli olarak güncellenmesinin yanında birçok yeni proses de endüstriye kazandırılmaktadır. Her mühendislik uygulamasında olduğu gibi bu proseslerin de birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Proses seçimi üretilecek parçanın geometrik doğruluğu ve mekanik özellikleri gibi birçok özelliğine etki etmektedir. Ayrıca üretim süresi ve maliyeti de proses seçiminden etkilenmektedir. Yani göz önünde bulundurulması gereken birçok etmen bulunmaktadır. Eklemeli imalat prosesinin en önemli kısıtlarından bir tanesi de parçanın boyutlarıdır. Yeteri kadar iyi ve son derece ucuz prensibi gözetilerek parçanın çalışma koşullarına en uygun eklemeli imalat yönteminin seçilmesi ise literatüre hâkim olmakla birlikte güncel literatürün sürekli olarak takip edilmesini gerektirmektedir. Maliyet ve işçiliğin fazla olduğu bazı durumlarda ise eklemeli imalat bir seçenek olmaktan çıkarılarak geleneksel yöntemler değerlendirilmelidir.

### 2.3.5. Hata kontrolü

Eklemeli imalat teknolojisinde de diğer üretim yöntemlerinde olduğu gibi hatalar olmadan üretim gerçekleştirmek mümkün değildir. Kullanıma sunulmuş ticari eklemeli imalat cihazları kalite kontrol sistemleri barındırmadığı için her zaman güvenilir değildir (Brajlih vd., 2011). Ancak, teknolojinin özellikle havacılık sektöründe işlevsel parçalarda kullanılmasıyla birlikte, bazı ticari markalar kendi ürettikleri hammaddelerin ve belirledikleri üretim parametrelerinin kullanılması sonucunda üretilecek parçaların bazı özelliklerini garanti edebilmektedir.

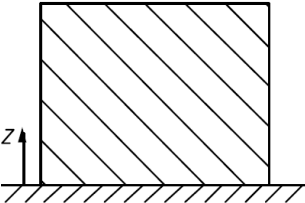
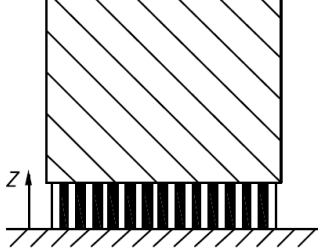
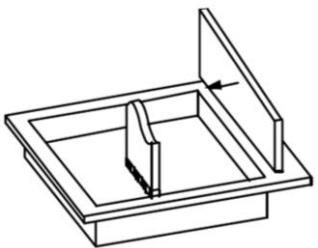
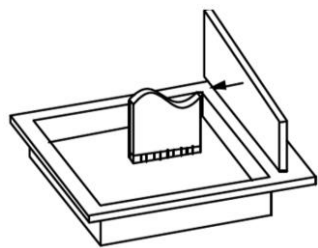
Eklemeli imalat prosesinde oluşacak hatalar üretim öncesi işlem hataları, proses sırasında oluşabilecek hatalar ve malzeme hataları olarak üç kategoriye ayrılabilir. Üretim öncesi işlem hataları parçanın STL verisinden, dilimlenmesinden, yapı oryantasyonundan ve üretim yolunun planlanmasından kaynaklanabilir. Bu aşamada hatalar öngörülebilir ve minimize edilebilir. Ancak eklemeli imalat prosesinin çalışma prensibi düşünüldüğünde tamamen yok edilemez. Üretim planlamanın tamamen doğru yapıldığı varsayıldığında bile proses aşamasında bazı hatalar meydana gelebilir. Tek bir katmanda meydana gelebilecek bu hatalar eklemeli imalat prosesinde kümülatif olarak tüm katmanları etkileyebilmektedir. Birçok eklemeli imalat cihazı içerisine entegre edilmiş bir hata tespit ve geri bildirim sistemi bulunmadığı için bir hata oluşmuş olsa bile cihazın bunu tespit etmesine imkân yoktur ve üretime devam etmektedir. Bunun sonucunda ise Şekil 2.11'deki gibi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Hatanın kümülatif olarak ilerlediği ilgili örnekte açıkça görülebilmektedir. Oluşabilecek bazı hatalar operatör gözetimi ile tespit edilebilir. Ancak hata fark edilse bile parçayı kurtarmak mümkün değildir.



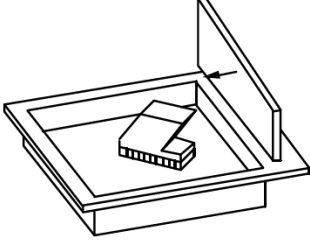
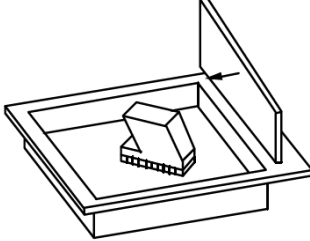
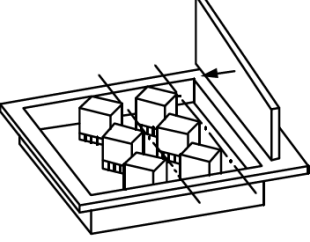
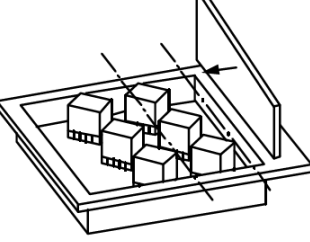
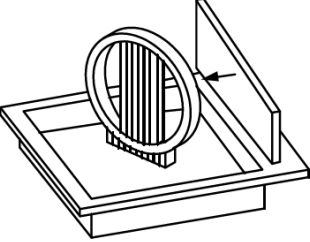
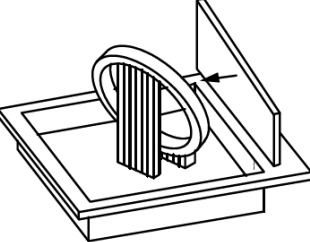
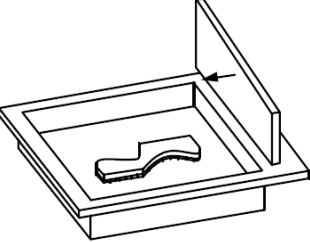
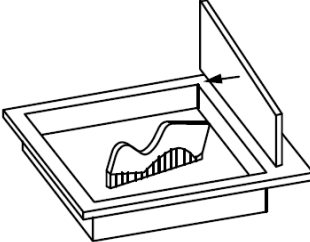
**Şekil 2.11.** Üretilmek istenen parça (sol), FDM prosesinde meydana gelen bir hata sonucunda üretilen parça (sağ) (Oropallo ve Piegl, 2016)

PBF prosesinde oluşabilecek bu hataların engellenmesi için ISO-ASTM 52911’de bazı öneriler sunulmuştur ve bu öneriler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Ancak malzemeden kaynaklanan hataları tespit veya tahmin etmek oldukça zordur. Malzemelerden kaynaklanan hatalar genellikle parçanın mekanik özellikleri ve geometrik doğruluklarını önemli ölçüde etkilemektedir. Üretim sırasında ve sonrasında büzülme ve gerilmeden kaynaklanan çarpılmalar meydana gelmektedir. Günümüzde bu hatalar tamamen engellenebilmiş değildir.

**Çizelge 2.2.** ISO/ASTM 52911’de verilen parça yerleşim önerileri

Açıklama	Kötü	İyi
Direkt tablaya yerleştirilen parçaların tabladan ayrılması oldukça zor ve karmaşıktır. Hem tabla hem parça hasar görebilir. Bu nedenle tabla ile parça destek yapıları ile ayrılabilir.		
Parça tablaya toz malzemeyi dağıtan sistem ile çarpışma alanı en az olacak şekilde yerleştirilebilir. Böylece olası bir çarpışma durumunda cihaz minimum hasar alır.		

**Çizelge 2.2.** ISO/ASTM 52911’de verilen parça yerleşim önerileri (devam)

<p>Parçanın keskin ve deformasyona açık kısımları yerine belirli bir derece açılı olan unsuru toz serme sistemi ile karşılaşacak şekilde yerleştirilebilir. Uygun açı genellikle 10°’dir.</p>		
<p>Toz serme sistemi ile yaşanabilecek teması en aza indirmek için parçalar aynı eksende yerleştirmek yerine ötelenerek yerleştirilebilir.</p>		
<p>Destek yapılarının parçanın yüzey kalitesinde ortaya çıkardığı olumsuz etkiyi engellemek için destek yapılarının bitiş noktası parça üzerine değil tablaya uzatılmalıdır.</p>		
<p>Tek seferde üretilen katman alanları azaltılarak çarpılmalar azaltılabilir.</p>		

### **2.3.6. Çok-malzemeli üretim**

Tek bir malzeme ile üretim yapan eklemeli imalat proseslerinin yanında birden fazla malzemenin de kullanıldığı yöntemler mevcuttur. Bu başlık altında incelenecek prosesleri birden fazla yazıcı ünite ile farklı renklerde aynı malzeme ile üretim gerçekleştiren proseslerden ayırmak gereklidir. Birden fazla malzeme kullanılarak üretilen parçalar heterojen objeler olarak adlandırılmaktadır. Birden fazla malzeme ile üretilen bir nesne iki gruba ayrılabilir. Heterojen bir parça içinde birden fazla malzeme içerir. Ancak bu iki malzeme keskin sınırlar ile ayrılır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir parçada ise sınırlar belirgin değildir ve malzemeler gradyan olarak kesişirler. Ancak bu uygulamalarda malzemeleri birleştirmek yüksek malzeme bilimi bilgi gereksinimi gerektirmektedir. Ayrıca birçok karmaşıklığı da beraberinde getirmektedir.

### **2.3.7. Cihaz ve bakım sorunları**

Şu anda piyasada bulunan eklemeli imalat üretim makineleri, yaklaşık 40 yıllık süreçte çok yol kat etmiştir. Bununla birlikte, hala bakım ve performans sorunları mevcuttur. Başarılı bir üretim için standart bir yaklaşım yoktur ve her makine ile uygun parametreler belirlenmelidir. Bir konfigürasyon bir parçanın üretiminde başarılı sonuçlar verse bile diğer tasarımlarda aynı başarıyı garanti etmeyebilir. Üretim gerçekleştirilebilse bile kalite ve geometrik doğruluk anlamında tatmin edici olmayabilir. Halihazırda cihazların ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasının yanında lazer ile üretim yapılan cihazlarda lazerin kalitesine bağlı olarak 4 000 ile 15 000 saat aralığında bir kullanım ömrü biçilmektedir (Gibson vd., 2010a). Ayrıca lazerler üzerinde kullandıkları malzemeler için ince ayar gerektirir. Lazer parametrelerinin yanlış olması gereksiz aşırı sertleşmeye veya sinterlemeye neden olabilir (Pham & Gault, 1998). Daha ucuz yöntem olan malzeme ekstrüzyonu proseslerinde ise malzeme bir nozülünden dışarı itildiğinden, baskı kafasında işlemin ortasında tıkanma sorunları yaşanabilir. Bu üretim proseslerinde parça kalitesi ve üretim süresi nozülün çapına bağlıdır. Ayrıca bu parametreler üzerinde malzemenin itilme hızı ve nozülün hareket hızı da etkilidir.

### **2.3.8. Yapı oryantasyonu**

Yapı oryantasyonu destek yapısı miktarını, yüzey kalitesini, malzemenin mekanik özelliklerini, üretim süresini ve maliyetini büyük ölçüde etkilemektedir. Yapı oryantasyonunun optimizasyonu ise parçanın farklı açılarda döndürülerek bir veya daha fazla parametrenin en düşüğünü ya da en fazlasını bulmak için çözülmesi gereken bir problemdir. Parçanın uygulamasına veya amacına bağlı olarak, bazı özellikler diğerlerinden daha önemli olabilir. Bu, parçanın oryantasyonunu bir optimizasyon zorluğu kadar bir tasarım zorluğu haline de getirir (Gibson vd., 2010a). Parçaya bağlı olarak, tasarımın ihtiyaçlarını karşılayan optimal bir yönelim olmayabileceği de fark edilmelidir. Bu, özellikle birden çok kriteri aynı anda optimize etmeye çalışırken geçerlidir. Çünkü bazı kriterler birbirleri ile çelişmektedir. Farklı yönelimlerin miktarı teorik olarak sonsuzdur. Ne kadar çok kriter değerlendirmeye katılırsa, aslında her birinden o kadar taviz verileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Pandey vd., 2007).

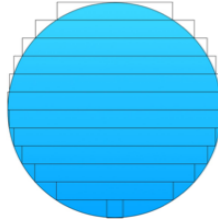
Tezin ilerleyen kısımlarında yapı oryantasyonu ve optimizasyonu konusunda detaylı bir literatür taraması sunulacaktır.

### **2.3.9. Dilimleme**

Tüm eklemeli üretim süreçleri, parçanın üretim süreci için bir STL veya CAD modelinin dilimlere bölünmesini gerektirir. Model, dilimlerin kesit konturunu bulmak için üretimin gerçekleştiği tabla ile paralel düzlemlerle kesiştirilir. Dilimin yüksekliği katman kalınlığına göre belirlenir. Dilimleme işlemi, modeli, üretim yolunun planlanabilmesi için hazırlar (Kulkarni vd., 2000). Günümüz makinelerinde kullanılan en yaygın dilimleme yöntemi, geometriden bağımsız olarak her dilimin aynı katman kalınlığına sahip olduğu tek tip dilimlemedir.

Dilimleme probleminde iki ana zorluk vardır. Birincisi basamaklı kenarların oluşmasına neden olan merdiven etkisidir. İkincisi ise, Şekil 2.12’de görüldüğü üzere dilimin tam geometri üzerinde bulunması yerine orijinal modelin içine veya dışına taşıdığı durumda oluşan kapsama problemidir. Bunlar hem yüzey kalitesinin hem de doğruluğun zayıf olmasının nedenleridir. Dilimleme işlemi doğrudan parçanın üretim süresi, doğruluğu ve pürüzlülüğü ile ilgilidir (Phatak & Pande, 2012). Kapsama problemi ve merdiven etkisini

en aza indirmek amacıyla, uyarlanabilir dilimleme üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Uyarlanabilir dilimleme, yerel geometride daha iyi birleştirme sağlamak ve yüzey kalitesini iyileştirmek için katman kalınlığını değiştirme fikridir (Ma vd., 2004). Mevcut cihazlar uyarlanabilir dilimleme prosedürü için önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Mevcut eklemeli imalat makinelerinin çoğu sabit bir kalınlığa sahip olduğundan, baskı işlemi sırasında kalınlık değiştirilemez. Katman kalınlığını değiştirmek, parçaların veya parametrelerin baskının ortasında değiştirilmesini gerektirebilir, bu da üretim süresini ve hata olasılığını önemli ölçüde artırabilir (Pandey vd., 2007).



**Şekil 2.12.** Kapsama problemi (Oropallo ve Piegler, 2016)

STL, düzlemsel üçgenleri kullanan yalnızca bir yaklaşık model olduğundan, dilim geometrisi bir kontur yerine bir çokgen olacaktır. Mozaikleme hatasından kaynaklanan bu ek hata, kapsama sorununa eklenmektedir. Bu hata üçgen sayısının artırılmasıyla minimize edilebilir. Ancak tamamen ortadan kaldırılamaz. Ayrıca üçgen sayısının artması hesaplama yükü de getirir. STL modelini dilimlemenin alternatifi, CAD modelini doğrudan dilimlemektir. Bu, yaklaşık temsilden kaynaklanan hatalardan, yanlışlıklardan ve fazlalıklardan kaynaklanan tüm sorunları önler. Ancak, bu yöntemin de kendi zorlukları vardır. STL modelini dilimlemek kesit alanında en dışarıda kalan tüm noktaları birleştirme meselesidir, ancak CAD modelleri analitik yüzeyler olarak tanımlanır ve bu kadar basit bir şekilde belirlenemezler (Mohan Pandey vd., 2003). Modelin karmaşıklığına ve yatay düzlemle kesişimleri bulmak için gereken hesaplamaların miktarına bağlı olarak doğrudan dilimleme zaman alıcı olabilir (Sun vd., 2007).

### **2.3.10. Hız**

Bir parçanın üretilmesi için gereken süre, herhangi bir işlemin sınırlayıcı faktörü olabilir. Eklemeli imalat, geleneksel üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında karmaşıktır.



Frezelemeye kıyasla, eklemeli imalat çok daha az kurulum gerektirir ve tek bir baskıda daha karmaşık parçalar üretebilir (Gibson vd., 2010a). Hız, çok genel bir bakış açısıyla üretilmek istenen parçanın üretim doğrultusundaki yüksekliği olarak görülmektedir. Ancak bu tam olarak doğru değildir. Üretim süresi farklı prosesler için tarama stratejisi, destek yapısı miktarı ve yazdırma hızı gibi farklı parametrelerden etkilenmektedir. Donanım, üretim sürecindeki en büyük darboğaz olmasına rağmen, üretim öncesi hazırlık süreci de üretim süresini olumsuz etkiler ve neredeyse tamamen kullanılan yazılımlar ile alakalıdır (Brajlih vd., 2011). Eklemeli imalat prosesinde üretim süreleri oldukça uzundur. Teknolojinin gelişimiyle bu sorunlar çözülmeye çalışılmaktadır. Güncel teknolojinin geldiği durumda PBF proseslerinde tek lazer yerine iki veya daha fazla lazer kullanarak prosesi daha hızlı hale getirmişlerdir.

#### **2.4. Havacılık ve Uzay Sektöründe Sağlanan Avantajlar**

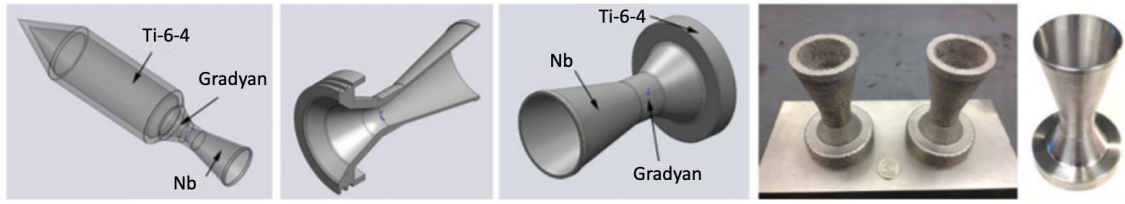
Havacılık sektöründe eklemeli imalat teknolojilerinin kullanılmasıyla, geleneksel imalat yöntemlerine göre, bazı avantajlar sağlanmaktadır. Bu avantajlar yedi başlık altında incelenmiştir.

##### **2.4.1. Yeni tasarım sınırları sağlaması**

Eklemeli imalat teknolojilerindeki büyüme ve yeni, son derece hassas makinelerin hızlı gelişimi nedeniyle, tasarım sınırlarını sürekli olarak değiştirmektedir. Tasarımcıların geleneksel üretim teknolojilerine yönelik mevcut tasarımları eklemeli imalat teknolojisi ile üretme eğilimi vardır. Ne yazık ki, bu stratejiler eklemeli imalatın yeteneklerinden yararlanmamaktadır ve genellikle geleneksel yöntemler kullanılarak daha ucuza ve daha kolay imal edilebilen parçaların olması gerekenden daha pahalı imal edilmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu, geleneksel imalat yöntemlerinin sınırlamaları nedeniyle daha önce değerlendirilememiş olası tasarımların, eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı genişlemiş sınırlar ile tekrar gözden geçirilmesiyle çözülebilir. Bu yeni tasarım sınırları arasında, havacılık ve uzay teknolojilerine özel ilgi duyan birkaç alan vardır.

Bu alanlardan biri geçişli yapıların (*gradient structures*) eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmesidir. Geçişli yapılar parçanın belirli bölgelerinde belirli özellikleri sağlamak için tasarlanan yapılardır. Eklemeli imalat ile üretilen geçişli yapılar birkaç farklı

uygulamada kullanılmıştır (Hofmann vd., 2015). Örneğin, titanyumdan niyobyuma geçiş yapan alaşımlar Şekil 2.13'te görüldüğü gibi roket nozülleri için geliştirilmiştir (Hofmann vd., 2014). Genel olarak, geometrisi boyunca farklı konumlarda farklı özelliklere sahip bir nesneye sahip olmak, bir dizi zor mühendislik problemine geniş bir çözüm alanı açmaktadır. Özellikle, tek bir parça içinde birden fazla malzemeye sahip olmak, farklı termal genleşme katsayıları, mıknaatıslanma ve yüksek sıcaklık toleransı gibi belirli fiziksel uyumsuzluk sorunlarını çözebilir.



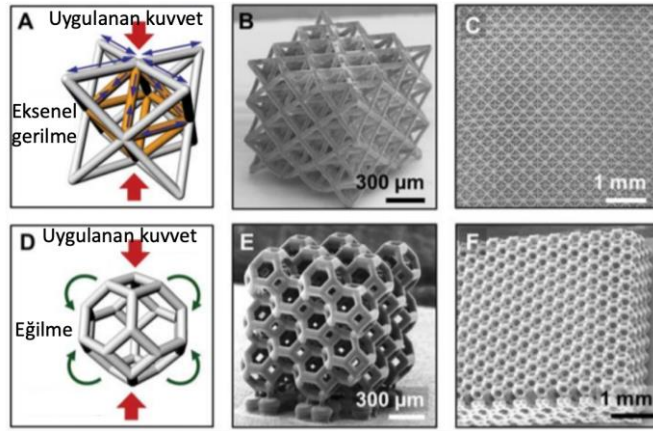
**Şekil 2.13.** Roket nozüllerinin eklemeli imalat ile üretilmesi (Hofmann ve ark. 2014'ten değiştirilerek alınmıştır)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklık uygulamaları, piezoelektrik ve termoelektrik gibi birçok uygulama için arzu edilen bazı özelliklere sahiptirler. Ancak, seramik parçaların geometrisi, yüksek işleme ve kalıplama maliyetlerinden ötürü geri planda kalmıştır. Seramik malzemelerin eklemeli imalatı, bu maliyetli işleme süreçlerini azaltabilir veya ortadan kaldırabilir ve karmaşık yapıların imalatına izin verebilir (Zocca vd., 2015). Eklemeli imalat teknolojileri, farklı özelliklere sahip malzemelerin birbiri içinde biriktirilmesine izin vermektedir. Bunun bazı örnekleri, geleneksel bir metal kabuk içine gömülü seramik dalga kılavuzu dielektrikleri, yapısal elemanlar içindeki gömülü devre, entegre güç hatları veya uzay aracı yapılarına gömülü sensörler olabilir. Tasarım iyi düşünülmüşse, bu özelliklerin birçoğu çok az ek maliyetle veya hiçbir ek maliyet olmadan yapıya eklenebilir. Bu teknolojiye örnek olarak, temel metal devrelerini bir Polilaktik Asit (PLA) plastiği matrisine entegre edebilen ve gerçek zamanlı olarak işlevsel bileşenler üreten elektronik 3D yazıcıları ortaya çıkaran Voxel8 gibi satıcılar tarafından gerçekleştirilen halihazırdaki uygulama gösterilebilir. Bunun bir örneği, Şekil 2.14'te gösterilen, neredeyse tamamen tek parça halinde üretilen ve tüm devreleri entegre ederek sadece batarya ve motorları entegre edilecek şekilde üretilen quadcopterdir. Bu kapsamda yapılan çalışmalara eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen yapıların içerisine gömülen sensörler ile akıllı yapıların üretilmesi de eklenebilir (Hehr vd., 2018).



**Şekil 2.14.** Bir quadcopter örneği (Shapiro ve ark. 2016'dan değiştirilerek alınmıştır)

Eklemeli imalat teknolojisinin sağladığı diğer bir avantaj ise, çeşitli yapısal uygulamalar için mikro kafes yapılarının üretilebilmesidir. Kafes yapıları, moleküler seviyelerden santimetre seviyelerine kadar imal edilme potansiyeline sahip olmasına rağmen, katkı maddesi imalatındaki sınırlamalar, alt sınırı birkaç mikrometreye yerleştirir (Şekil 2.15). Kafes yapıları son derece yüksek mukavemet-kütle oranlarına sahip olabilir ve eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak imal edilebilir (Zheng vd., 2014).



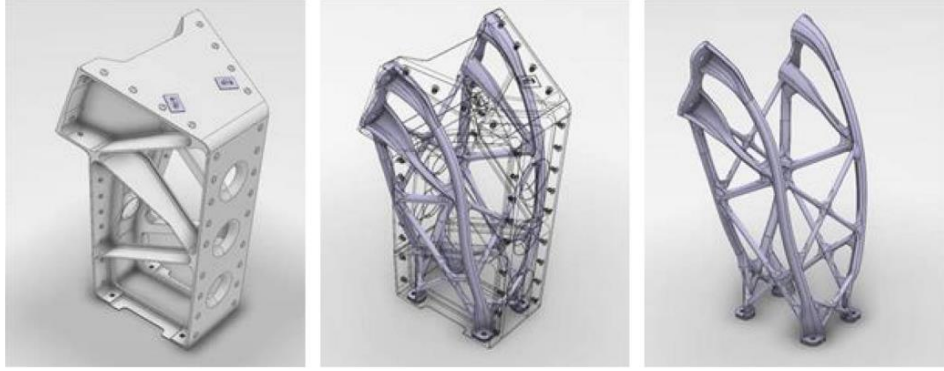
**Şekil 2.15.** Kafes yapıları örneği (Zheng ve ark. 2014'den değiştirilerek alınmıştır)

#### 2.4.2. Çok bileşenden oluşan montajların birleştirilebilmesi

Havacılık için eklemeli imalat teknolojisinin ikinci önemli uygulaması, çoklu montajların birleştirilebilmesidir. Genellikle birçok yapı, bölümler halinde imal edilir ve çeşitli tipte bağlantı elemanları kullanılarak birbirine bağlanır. Bu stratejinin kullanılmasının nedeni, genellikle montajların geleneksel imalat teknikleri kullanılarak tek bir parça olarak kolayca imal edilememesidir. Bununla birlikte, eklemeli imalat teknolojisinin

kullanılması, ihtiyaç duyulan bağlantı elemanlarının sayısını azaltabilir ve bir montaj içindeki bileşenleri tek bir parçada birleştirebilir.

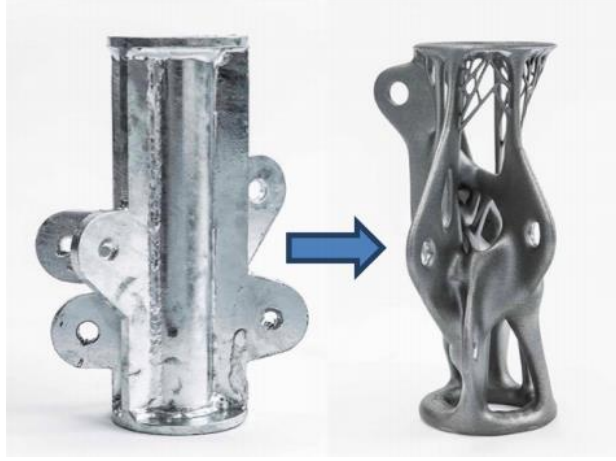
Bunun bir örneği, Şekil 2.16'da gösterilen, Airbus tarafından eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş alüminyum parça kullanılan, Eurostar E3000 uydusunun bazı bileşenleridir. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen braketler, ilk tasarımına göre %35 daha hafif olmakla kalmaz ve aynı zamanda %40'a kadar daha sağlam olabilir. Bunun yanında, birkaç alüminyum bileşenden oluşan ve 44 adet perçin kullanılarak montajı yapılan braket tek adımda üretilmiştir. Böylece, malzeme israfını azaltılmıştır ve montajı basitleştirilmiştir. Bu yapı, Birleşik Krallık'taki ilk uçuşa uygun eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen parçayı temsil etmektedir (Shapiro vd., 2016).



**Şekil 2.16.** Airbus tarafından alüminyum malzemeden üretilen Eurostar 3000 uydu parçası (Shapiro ve ark. 2016)

### 2.4.3. Yüksek karmaşıklığa sahip parçaların üretilmesi

Eklemeli imalat teknolojilerinin önemli bir avantaj sağlayabileceği üçüncü bir alan, oldukça karmaşık parçaların üretilebilmesidir. Çoğu durumda, mukavemet ve sertlik için optimize edilmiş mekanik tasarımlar karmaşıktır ve geleneksel yöntemlerle imal edilmesi pahalıdır veya imkansızdır. Bu nedenle üretim kolaylığı sağlamak için, optimal olmayan tasarımlar ikame edilir. Eklemeli imalat teknolojisi, daha karmaşık tasarımların daha düşük maliyetlerle üretilmesine izin vererek bu sorunu çözebilir. Şekil 2.17, çok uluslu bir mühendislik danışmanlığı şirketi olan Arup'un araştırma ve geliştirme ekibi tarafından optimize edilerek tasarlanan bir ürün örneğini göstermektedir. Bu tasarım sadece optimize edilmiş bir geometriyi değil, aynı zamanda atık malzemedeki azalmanın yanında kütlede %40'tan fazla bir azalmayı temsil eder (Shapiro vd., 2016).



**Şekil 2.17.** Optimize edilerek eklemeli imalat ile üretilen bir parça örneği (Shapiro ve ark. 2016)

#### **2.4.4. Ağırlık azalması için avantaj sağlaması**

Bu başlık bir önceki başlığın devamı olarak nitelendirilebilir. Genellikle tasarımcılar geleneksel üretim yöntemlerinin getirdiği kısıtlara bağlı kalarak parçanın üretilebilir olması için çalışma koşulları düşünüldüğünde optimal olmayan tasarımlar ortaya koymaktadır. Ancak eklemeli imalat teknolojisi ile karmaşık parçaların üretilebilmesi söz konusu olduğu için tasarım sınırları genişletilebilir. Böylece çalışma koşulları çerçevesinde optimum tasarımlar ortaya konabilir ve halihazırda kullanılan ürünlerin yeniden tasarlanmasıyla ağırlık azaltılabilir.

Bu çalışmaya örnek olarak, Şekil 2.18’de gösterilen, Sentinel-1 gözlem uydusunun anten desteği verilebilir. Hafif parçayı oluşturmak için alüminyum-silikat-magnezyum alaşımli tozlar kullanarak SLM prosesi kullanılmıştır ve %56 oranında kütle azalması sağlanmıştır (Torres vd., 2012).



**Şekil 2.18.** Sentinel-1'in anten desteği (Shapiro ve ark. 2016)

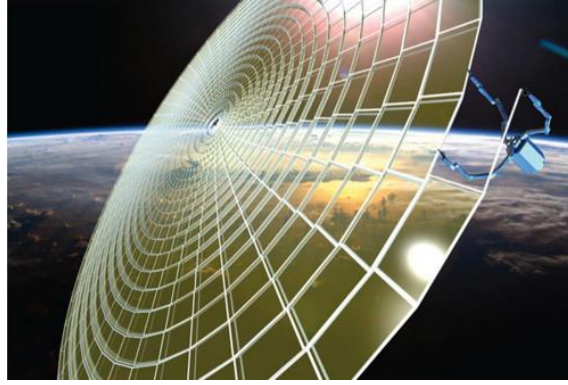
#### **2.4.5. Malzeme araştırma ve uyarlama aracı olarak kullanılabilmesi**

Eklemeli imalat teknolojisinin başka bir uygulaması, malzeme özellikleri ve süreçleri hakkında bir araştırma aracı olabilmesidir. Pahalı alaşım bileşenler ve seramik kompozisyonlar düşünüldüğünde yeni malzemelerin geliştirilmesi oldukça maliyetli olabilir. Eklemeli imalat teknolojisi, daha küçük miktarlarda malzeme ve parti boyutlarının kullanımına izin verdiğinden dolayı finansal olarak uygun olmayabilecek araştırma fırsatlarını mümkün kılabilir.

Eklemeli imalat teknolojisi ile mikro seviyeden orta seviyeye kadar çalışılabilen özel geometrilerin ve kompozisyonların oluşturulabilmesi büyük bir fayda sağlamaktadır. Mikroyapısal terzilik (*microstructural tailoring*), içi boş mikro küreler, daha düşük gerilimli bölgelerde daha büyük tanecikler veya yerleşik kaplamalara sahip yapılar gibi ikincil fazların kullanımını içerebilir. Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak, mikro yapı, örneğin kaba bir numune içinde ince taneli bir bölge oluşturmak için daha yavaş veya daha hızlı üretim yapılarak bekleme süreleri ayarlanabilir ve farklı mikro-yapılar tek bir numune içinde manipüle edilebilir. Mikroküreler veya toklaştırma/sertleştirme ajanları gibi seçici ajanların eklenmesi, tek bir yapıda tedarik edilebilen hızlı varyasyon sayısı sayesinde kolayca elde edilebilir ve uygulanabilirler (Shapiro vd., 2016).

#### 2.4.6. Yerinde imalat ve montaj

Eklemeli imalat teknolojisinin uçuş uygulamaları için bir başka cazip olasılık, robotik kullanılarak uzayda çok büyük yapıların yerinde imal edilmesidir. Kilometre mertebesinde son derece büyük yapılar, farklı tasarım yaklaşımları kullanılarak üretilebilir. Özellikle, bu yapıların fırlatma veya yerçekimi yüklerine dayanması gerekmediğinden, düşük mukavemet için tasarlanabilirler ve bu nedenle yörüngeye kaldırılması için önemli ölçüde daha az hammadde gerektirirler. Bu yapıların tam potansiyellerini gerçekleştirmek için otonom olarak imal edilmesi ve bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bunun bir örneği olarak, Şekil 2.19'da Tethers Unlimited tarafından sunulan bir anteni eklemeli imalat teknolojisi ile uzayda üretme kavramı gösterilebilir (Shapiro vd., 2016).



**Şekil 2.19.** ATHLETE robotu (Shapiro ve ark. 2016)

Bu yönde atılan bir adım olarak, mikro yerçekiminin eklemeli imalat teknolojileri üzerindeki etkisini incelemek için Uluslararası Uzay İstasyonunda plastik parçaların üretimi halihazırda uygulanmıştır (Shapiro vd., 2016).

#### 2.4.7. Yerinde kaynak oluşturma

Uzay araştırmaları için ilginç bir uygulama, yerel kaynakları kullanarak yapıların yerinde imalatının kullanılmasıdır. İnsan keşif yapıları, hammaddeyi uzaya fırlatmanın getirdiği zorluklardan kaçınarak, yerel regolit kullanılarak mobil bir eklemeli imalat teknolojisi ile üretilebilir. Bu konu, 1980'lerden beri NASA'nın ilgisini çekmektedir. Freitas ve Gilbreath tarafından 1980'de yazılan bir NASA raporunda, minerallerin, metallerin, gazların ve diğer hammaddelerin ayda, asteroitlerde ve kuyruklu yıldızlarda

bulunabilirliğini ve bunun yanı sıra hem mekanik bileşenler hem de entegre devre ve ilgili enerji ihtiyaçları konusunda kapsamlı ve ayrıntılı bir yaklaşım ortaya koymuştur. NASA, Şekil 2.19’da tasvir edilen ATHLETE robotunu güneş enerjili regolit sinterleme teknolojileriyle bütünleşik halde kullanılmasıyla bu alandaki teknoloji gelişimini ilerletmiştir (Howe vd., 2015). Son çalışmaların önemi, insan ekipler için dünya dışı barınma ve gezegen yüzeylerindeki robotik ekipmanlar için çözümler sağlamaktır.

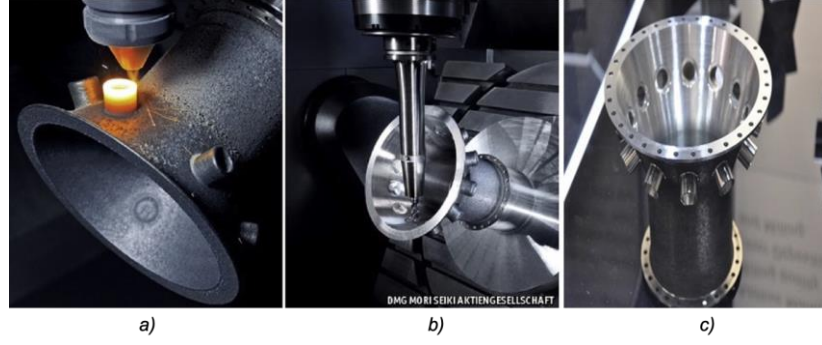
## **2.5. Havacılık Sektöründe Eklemeli İmalat Uygulamaları**

### **2.5.1. Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi ile gerçekleştirilen uygulamalar**

DED yöntemi polimerler, seramikler ve metal matrisli kompozitler ile üretim gerçekleştirmek için kullanılabiliyor olsa da özellikle havacılık uygulamalarında ağırlıklı olarak metal tozları veya metal teller ile üretim gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Titanyum, inconel, paslanmaz çelik, alüminyum ve bunların alaşımları gibi çok çeşitli metaller, havacılık endüstrisinde DED prosesiyle geniş çapta uygulanmaktadır. PBF prosesleriyle karşılaştırıldığında, DED prosesinde çok eksenli biriktirme yapılabilir ve birden fazla malzeme kullanılabilir. Çok eksenli biriktirme kabiliyeti nedeniyle ince duvarlı yapıların ve iç kanalları bulunan karmaşık geometrilerin destek yapıları olmaksızın üretilebilmesini sağlanmaktadır. DED prosesinde, farklı malzemeleri içerisinde barındıran toz hazneleri ile, Fonksiyonel olarak Derecelendirilmiş Malzemeler (*Functionally Graded Materials*, FGM) ile tasarlanmış parçaları da üretilebilir. Ayrıca DED prosesi türbin kanatları ve motor yanma odaları gibi yüksek değerli havacılık parçalarının onarımı için kullanılabilir.

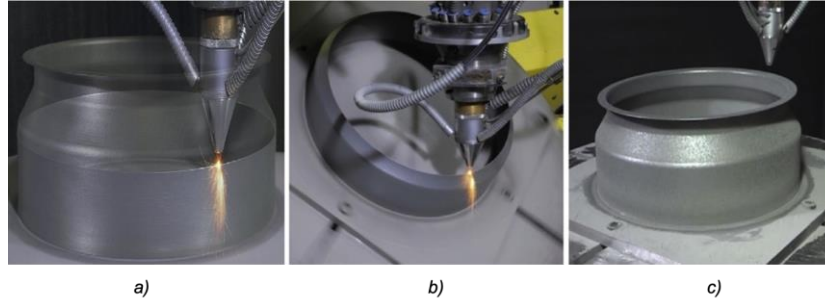
DMG Mori firması LASERTEC 65 3D adı verilen eklemeli imalat ve talaşlı imalat proseslerini hibrit olarak kullanan bir sistem geliştirmişlerdir. Önce eklemeli imalat ile parçayı üretmişler ve sisteme dahil edilen talaşlı imalat ile üretilen parçanın yüzeyini işlemişlerdir. Şekil 2.20’de verilen 180 x 150 mm boyutlarındaki paslanmaz çelik malzemenin eklemeli imalat ile üretimi 230 dakika ve yüzey işlemleri ise 76 dakika sürmüştür (R. Liu vd., 2017).





**Şekil 2.20.** LASERTEC 65 3D sistemi kullanılarak gerçekleştirilen (a) çok-eksenli biriktirme, (b) çok-eksenli yüzey işleme ve (c) bitmiş parça (Liu ve ark. 2017)

TWI firması destek yapıları olmadan üretim gerçekleştirebilmek için beş eksenli bir Lazer Metal Yığıma (*Laser Metal Deposition, LMD*) prosesi kullanmışlardır. Şekil 2.21’de bulunan helikopter motorunun 300 mm çapında 90 mm yüksekliğindeki ince-duvarlı yanma odası başarıyla 450 dakikada üretilmiştir. Yapılan testlerde tüm parça için duvar yoğunluğunun %95,5’ten fazla olduğu görülmüştür (R. Liu vd., 2017).



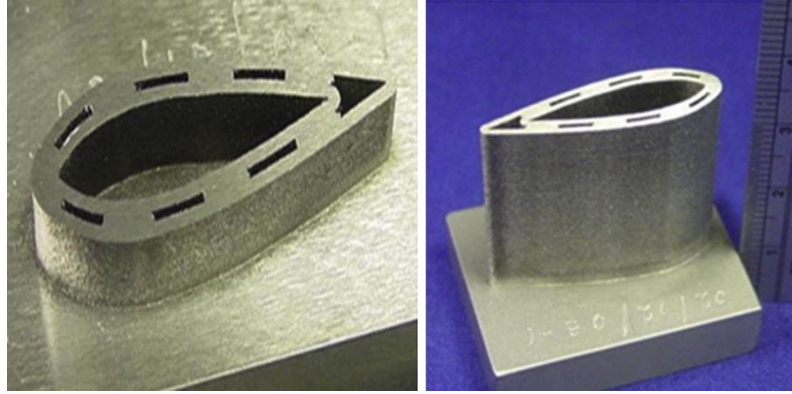
**Şekil 2.21.** IN718 ile üretilen bir helikopter motoru yanma odası üretimi örneği (a) ince duvarlı parçanın biriktirilmesi, çok-eksenli biriktirme ve (c) bitmiş parça (Liu ve ark. 2017)

Şekil 2.22’de gösterilen Bell Helikopter firmasının gaz türbini egzozunun altında bir ölçekli karıştırma nozülü birden fazla malzeme ile Lazer Net-Şekil Mühendisliği (*Laser Engineering Net-Shape, LENS*) prosesi kullanılarak üretilmiştir.



**Şekil 2.22.** Gaz türbini egzozunun altıda bir ölçekli karıştırma nozülü (Liu ve ark. 2017)

Havacılık sektöründeki ticari uygulamaların yanında Liou ve ark. (2001) çok-eksenli lazer biriktirme ve CNC işlemeyi birleştirerek hibrit bir süreç geliştirmiştir. Hibrit süreç, işlevsel metalik parçaların üretimi ve talaşlı imalatının başarıyla uygulanması ile yüzey kalitesi için daha büyük avantaj sağlamaktadır. Kanada'daki Integrated Manufacturing Technologies Institute of the National Research Council'de görev alan araştırmacılar Şekil 2.23'te verilen iç kanalları bulunan kanat profilini üretmişlerdir.



**Şekil 2.23.** Ti-6Al-4V malzemesinden üretilen ve iç kanalları bulunan kanat profili (Liu ve ark. 2017)

### **2.5.2. Toz yatak füzyonu (PBF) yöntemi ile gerçekleştirilen uygulamalar**

PBF proseslerini kullanan havacılık uygulamaları için paslanmaz ve takım çelikleri, titanyum ve alaşımları, nikel bazlı alaşımlar ve bazı alüminyum alaşımları gibi geniş bir malzeme yelpazesi mevcuttur. PBF işleminin önemli bir avantajı, sarkan yüzeyler için destek yapıları kullanılarak yüksek geometrik doğrulukta (0,05 mm) karmaşık şekiller

üretilebilmesidir. Bu PBF teknolojisini DED prosesinden ayırır. Bu avantaj, havacılık uygulamaları için optimize edilmiş karmaşık işlevsel parçaları hassas olarak üretebilmek için harika bir yetenek sağlamaktadır.

GE Havacılık, EOS firmasının geliştirdiği DMLS cihazını yeni-jenerasyon jet motor bileşenlerini üretmek için kullanmıştır. En çok dikkat çeken eklemeli imalat uygulaması Şekil 2.24'te gösterilen yeni yakıt nozülü olmuştur. Her bir LEAP motorunun içerisinde eklemeli imalat ile üretilen 19 adet yakıt nozülü bulunmaktadır. Eklemeli imalat sayesinde elde edilen yeni tasarım sınırları, daha karmaşık soğutma yollarına ve destek bağlarına sahiptir. Bu da geleneksel imalatla üretilen önceki parçaya kıyasla beş kat daha uzun hizmet ömrü sağlamıştır. Daha önce 18 parçanın birleştirilmesi ile üretilen montaj eklemeli imalatla tek parça halinde üretilmiştir. Parça bağlantısını sağlamak için gereken kaynak sayısı 25'ten 5'e düşürülmüştür. Ayrıca parça %25 oranında hafifletilmiştir.



**Şekil 2.24.** EOS cihazı ile üretilen GE yakıt nozülü (Liu ve ark. 2017)

Concept Laser, LaserCUSING kullanarak, doğadan esinlenmiş bir parça üretmek için SLM yöntemini kullanmıştır. Airbus A350 XWB'de kullanılan bir braket Şekil 2.25'te verilmiştir. Bu brakette kemik benzeri boşluklu bir yapı kullanılarak ağırlığı önemli ölçüde azaltılmıştır. Eklemeli imalat ile belirlenen yeni tasarım sınırları gözetilerek yapılan bu tasarım, önceki tasarıma göre %30 daha hafiftir. Geleneksel yöntemler ile

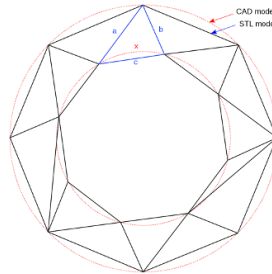
üretileen parçanın geliştirme süreci altı ay sürerken, yeni tasarım yalnızca bir ayda gerçekleştirilmiştir.



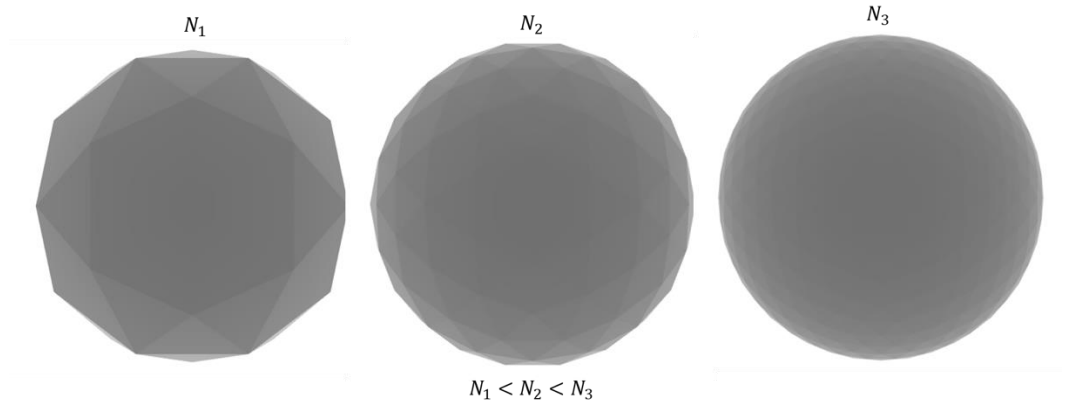
**Şekil 2.25.** Airbus A350 XWB'de eklemeli üretim kullanılarak üretilen ilk titanyum braket konektörü (Liu ve ark. 2017)

## 2.6. STL Dosya Tipi

STL dosya tipi, günümüzde hemen hemen her eklemeli imalat prosesinde, üçgen yüzeyler kullanarak CAD modelin yüzeylerini temsil etmek için kullanılmaktadır. STL, Şekil 2.26'da görüldüğü gibi basitçe CAD modelinin yüzeyini faset (*facet*) adı verilen üçgenler ile yaklaşık olarak temsil etmektedir. Bir STL dosyasındaki CAD yüzey yaklaşımının doğruluğu, maksimum faset boyutunun seçimine bağlıdır. Şekil 2.27'de verilen küre için STL dosyası farklı faset boyutları ile üretilmiştir ve geometrinin doğruluğuna etkisi açıkça görülmektedir. Her faset, bir birim normal vektör ve sağ el kuralı çerçevesinde sıralanan üç köşenin koordinatları ile tanımlanır. STL dosya tipinde koordinatlar yalnızca ölçüler ile temsil edilmektedir ve ölçülerin birimleri bulunmamaktadır.



**Şekil 2.26.** Bir CAD modelin STL ile yaklaşık olarak temsil edilmesi (*STL (file format)*, 2021)



**Şekil 2.27.** Farklı faset sayıları ile üretilen küreler ve geometrik doğrulukları

STL dosya tipi iki farklı format ile verileri barındırabilmektedir. Bunlardan ilki ASCII ve ikincisi ise İkili (*Binary*) formatıdır. Bir STL dosyası, tek bir üçgen için, ASCII tipinde aşağıdaki gibi temsil edilmektedir. İkili dosya formatı da benzer biçimde oluşturulmaktadır.

*solid name*

facet normal  $n_{i_x} n_{i_y} n_{i_z}$

outer loop

vertex  $v_{i1_x} v_{i1_y} v_{i1_z}$

vertex  $v_{i2_x} v_{i2_y} v_{i2_z}$

vertex  $v_{i3_x} v_{i3_y} v_{i3_z}$

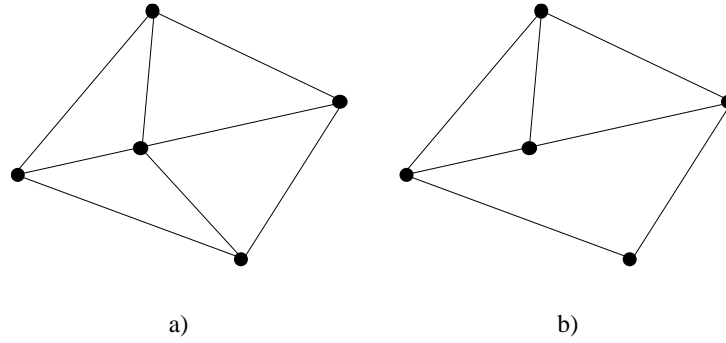
endloop

endfacet

endsolid *name*

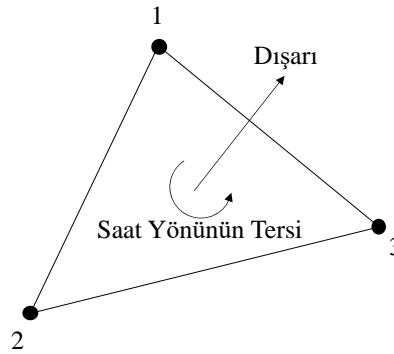
Burada  $\vec{n}_i$  yüzey normalini,  $v_{i1}$ ,  $v_{i2}$ ,  $v_{i3}$   $i$ 'inci üçgenin koordinatlarını temsil etmektedir.

Üç boyutlu bir hacmi düzgün bir şekilde oluşturmak için, yüzeylerin tamamı birbirine bağlanmalıdır. Yani yüzeyde herhangi bir boşluk bulunmamalıdır ve ters yüzey normalleri bulunmamalıdır. Şekil 2.28a'da olduğu gibi her kenar tam olarak iki üçgenin parçası olmalı ve kendisiyle kesişmeyen bir yere bağlanmalıdır. Özellikle eklemeli imalat prosesi gibi katman üzerine katman üretim yapılan teknolojilerde, yüzeyde eksik olması durumunda dilimlenen katmanı temsil eden dış hat üzerinde süreksizlik meydana gelecektir. Böylece oluşturulan veri bozuk olacaktır ve bu veri ile üretilen parça hatalı olabilir. Hatta üretim işlemi durdurulabilir.



**Şekil 2.28.** a) Doğru ve kabul edilebilir temsil ve b) yanlış ve geçersiz temsil

Yönlendirme kuralı kapsamında, üçgen yüzeyin yönünün, yani üç boyutlu nesnede hangi yönün içeri ve hangi yönün dışarı baktığının, iki şekilde belirtilmesi gerekmektedir (Şekil 2.29). Bu ikili değerlendirme verilerin tutarlılığını sağlanmasına ve bozuk verilerin tespit edilmesine yardımcı olmaktadır. Böylece yüzey normali ile düğümlerin yerleşimi hesaplanabilir ve eşleşmeler doğrulanabilir. Doğrulanamaması durumunda STL dosyasının bozuk olduğu belirlenebilir.



**Şekil 2.29.** Noktaların yönelimi ve yüzey normali

Tamamen pozitif oktant kuralı, üçgen köşelerinin koordinatlarının hepsinin pozitif olması gerektiğini söyler. Bu kuralın arkasındaki mantık, hafızadan tasarruf etmektir. Üç boyutlu nesnenin koordinat alanında herhangi bir yerde bulunmasına izin verilseydi, negatif koordinatlarla fazladan işlem yapmak gerekirdi. Negatif koordinatları saklamak için, işaretli kayan noktalı sayıların kullanılması gerekir. Ancak işaretli kayan noktalı sayılar, işareti saklamak için bir ek bit gerektirmektedir. Tüm koordinatların pozitif olması sağlanarak fazladan hafıza ve işlem kullanılması gereksinimini ortadan kaldırır.

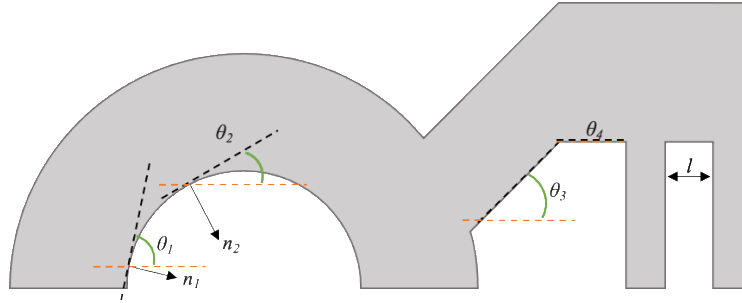
Üçgen saklama kuralı, üçgenlerin artan z-doğrultusundaki değeri düzeninde sıralanmasını önermektedir. Böylece üç boyutlu model daha hızlı dilimlenebilir. Bu kural uygulanması zorunlu olmamakla birlikte dilimleme işlemlerinin oldukça önemli olduğu eklemeli imalat prosesleri için veri işlemede avantaj sağlamaktadır.

STL dosya formatının en büyük avantajlarından biri, evrensel olması ve neredeyse tüm eklemeli imalat yazıcıları tarafından desteklenmesidir. Bulunabilecek çoğu üç boyutlu yazdırılabilir model, STL dosya biçimindedir. Bu ekosistemin varlığı, üç boyutlu yazıcı üreticileri tarafından geliştirilen STL tabanlı yazılım yatırımlarıyla birleştiğinde, formata büyük yatırımlar yapan büyük bir kullanıcı tabanının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu, STL dosyalarıyla ilgilenen çok sayıda üçüncü taraf yazılım olduğu anlamına gelir, ancak diğer dosya formatlarında durum böyle değildir. Ancak STL kullanmanın bazı dezavantajları da vardır. Baskı işlemlerinin doğruluğu mikron ölçeğinde çözünürlüğü kapsadığından, pürüzsüz eğimli yüzeyleri tanımlamak için gereken faset sayısı çok büyük dosya boyutlarına neden olabilir. Ayrıca bir STL dosyasına yazarlık ve telif hakkı gibi bilgileri eklemek de imkansızdır.

## 2.7. Destek Yapıları

Destek yapıları, birçok eklemeli imalat prosesinde parçanın başarılı şekilde üretilebilmesi için gerekli olan en önemli unsurlardan bir tanesidir (Cloots vd., 2013). Destek yapılarının en temel görevi üretilebilir açısı sınırını (Sarkma Açısı, *Overhang Angle*, *OA*) aşan sarkan yüzeylerin üretilebilir olmasını sağlamaktır. Şekil 2.30'da verilen parça üzerinde bulunan dört farklı yüzeyin, üretimin başladığı tabla ile yaptığı açılar  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  ve  $\theta_4$  olarak gösterilmiştir. Parçanın yüzeyindeki bir bölgenin açısı belirli bir sarkma açısından küçük olduğu durumda sarkan bölge olarak adlandırılır ve destek yapısı olmadan üretilmesi

mümkün değildir. Üretilbilir açı sınırı prosese göre değişiklik göstermektedir ve SLM prosesinde genellikle  $45^\circ$  olarak kabul edilmektedir. Sarkan yüzeyler belirli bir üretilbilir köprü mesafesini aşmadıkları durumda da kabul edilebilir bir hata payıyla üretilbilmektedir. Şekil 2.30'da gösterilen  $l$  ise üretilbilir en uzun köprü mesafesini temsil etmektedir. Örnek olarak  $\theta_1$  ve  $\theta_2$ 'nin bulunduğu silindirik kısımda  $\theta_1 > OA$  olduğu için destek yapısı olmadan üretilbilmektedir. Ancak  $\theta_2 < OA$  olduğundan dolayı sarkan yüzey olarak adlandırılır ve üretilmesi için destek yapıları gereklidir. Benzer şekilde  $\theta_3 < OA$  ve  $\theta_4 < OA$  olduğundan dolayı ve sarkan yüzeylerin boyutu üretilbilir en uzun köprü mesafesini aştığı için üretilmesi için destek yapısı gereklidir.



**Şekil 2.30.** Bir parça üzerindeki geometrik unsurlar

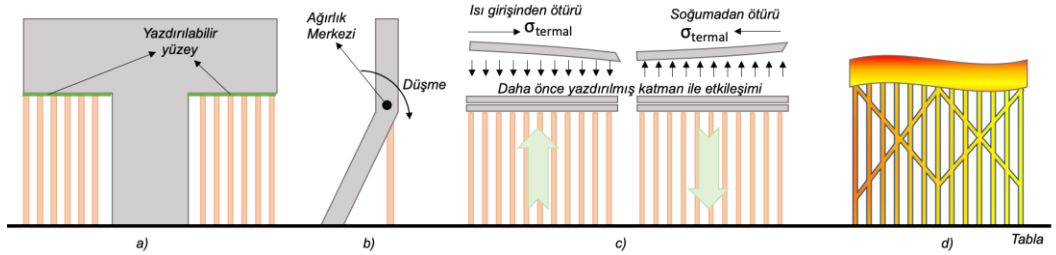
Destek yapıları farklı eklemeli imalat proseslerinde farklı görevleri yerine getirmek için kullanılmaktadır. Destek yapılarının görevleri temel olarak dört kategori altında incelenebilir.

- Destek yapılarının en temel görevi Şekil 2.31a'da görüldüğü üzere sarkan yüzeylerin üretilbilir olmasını sağlamaktadır. Tablanın boş olduğu ve biriktirme işlemi ile üretim yapılan FDM ve DMD gibi süreçlerde yalnızca mevcut katmanlar üzerinde malzeme biriktirilebilir. Bu nedenle, üretilmek istenen parçanın ilgili yükseklikteki sarkan unsurunu üretmek için yazdırılabilir yüzey oluşturulmalıdır. Toz yataklı proseslerde bu görevi serilen toz malzeme yerine getirebilmektedir.
- Üretilmek istenen parçada hiç sarkan unsur bulunmamasına rağmen yine de destek yapıları gerekli olabilir. Şekil 2.31b'de gösterildiği üzere parça ağırlığından dolayı düşme eğiliminde olabilir. Toz yataklı proseslerde her ne kadar toz malzeme bu ağırlığı bir miktar desteklese de bazı durumlarda düşmeye



engel olamamaktadır. FDM ve DMD gibi proseslerde parçanın yıkılmasını engellemek ve toz yataklı proseslerde oluşabilecek deformasyonları önlemek için destek yapıları gerekli olmaktadır.

- Özellikle metalik malzemeler ile üretim yapan bazı eklemeli imalat proseslerinde yüksek termal gradyanlar oluşmaktadır. Tekrarlı olarak meydana gelen yüksek ısı girişi ve ani soğuma işlemlerinden dolayı şekil bozulmaları ve kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir. Destek yapılarının bu eklemeli imalat proseslerinde bir görevi de Şekil 2.31c'deki gibi parça üzerinde oluşan bu etkilerden kaynaklanan bozulmaları engellemektir.
- Destek yapılarının son görevi de Şekil 2.31d'de olduğu gibi yüksek termal gradyanların oluştuğu proseslerde ısı iletiminin homojen olarak aktarılmasını sağlamaktır.



**Şekil 2.31.** Destek yapılarının görevleri a) yazdırılabilir yüzey oluşturmak, b) devrilmeyi önlemek, c) termal çarpılmayı engellemek ve d) ısı dağılımının her yerde eşit olarak dağıtılabilmesi

Destek yapılarını her ne kadar başarılı bir üretim için gereklilik olsa da beraberinde birçok problem getirmektedir. Destek yapılarının dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

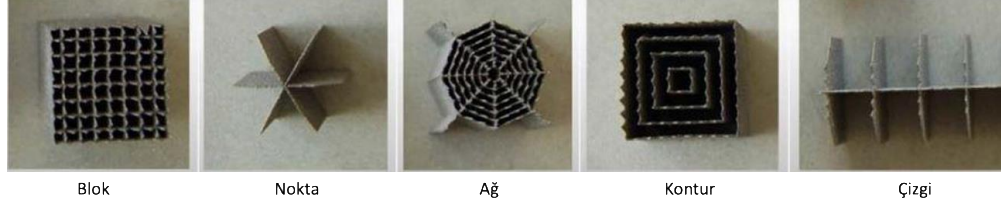
- Destek yapıları, yeniden kullanılmadıkları ve/veya geri dönüştürülemediği durumlarda çıkarıldıktan sonra atılmaları gerekmektedir. Bu nedenle hammaddenin boşa gitmesine neden olur.
- Bir parça üretilirken, destek yapısının da üretilmesi gerektiği için üretim süresi daha uzun olacaktır.
- Destek yapılarının üretilmesi için de enerji harcanmaktadır.
- Üretim gerçekleştirildikten sonra, destek yapılarının temizlenmesi gerekmektedir. Özellikle metal malzeme kullanılan prosesler düşünüldüğünde, önemli miktarda

işçilik gerekmektedir (Calignano, 2014). Destek yapılarının üretimden sonra kesilmesi, taşlanması veya frezelenmesi için fazladan zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

- Genellikle destek yapılarının parçadan el işçiliği ile çıkarılması gereklidir. El ve alet erişimi olmaması durumunda prosesin sağladığı geometrik özgürlük kaybolmaktadır.
- Destek yapılarının parça üzerinden temizlenmesi sırasında parçanın yüzey kalitesine zarar verilebilmektedir (Järvinen vd., 2014).
- Destek yapılarını tasarlamak ve parça üzerinde gerekli kısımlara yerleştirmek fazladan zaman ve işçilik gerektirmektedir (Jiang vd., 2018).
- Destek yapılarının parça tasarımına eklenmesi veri boyutunu artırır.
- Destek yapılarının tasarımı ve yerleşimi gibi birçok etmen operatörün uzmanlığına bağlıdır.

Tüm dezavantajlar malzeme maliyeti, sınırlı geometrik özgürlük, fazladan zaman, fazladan işçilik ve hasar riski olarak özetlenebilir. Tüm bu dezavantajlar göz önüne alındığında, enerji, zaman, materyal ve bunlara bağlı olarak oluşan maliyeti azaltmak için, destek yapılarının optimizasyonu oldukça önemlidir (Allaire vd., 2020).

Literatürde birçok farklı destek yapısı tipi bulunmaktadır (Şekil 2.32). Bu destek yapılarının isimleri genellikle şekillerine bakılarak tasarlanan kişiler tarafından verilmiştir. Bu nedenle bazı aynı tip destek yapıları literatürde farklı isimler ile anılmaktadır. Literatürde Y-destek yapısı (Gan & Wong, 2016), IY-destek yapısı (Gan & Wong, 2016), iğne (*pin*) destek yapısı (Gan & Wong, 2016), hücresel (*cellular*) destek yapısı (Strano vd., 2013; Vaidya & Anand, 2016), latis destek yapısı (Calignano, 2014; Cheng vd., 2019; Cloots vd., 2013; Hussein vd., 2013; Vaissier vd., 2019), ağaç (*tree*) destek yapısı (Vanek vd., 2014; Weber vd., 2020; Yicha Zhang vd., 2020), blok (*block*) destek yapısı (Calignano, 2014; Jhabvala vd., 2012; Weber vd., 2020), ağ (*web*) destek yapısı (Calignano, 2014; Järvinen vd., 2014), çizgi (*line*) destek yapısı (Calignano, 2014), çubuk (*bar*) destek yapısı (Weber vd., 2020), tüp destek yapısı (Järvinen vd., 2014) ve farklı yöntemler kullanılarak geliştirilen diğer tip destek yapıları kullanılmıştır (Allaire vd., 2020; Allaire & Bogosel, 2018; Kuo vd., 2018; Y. Liu vd., 2019).



**Şekil 2.32.** Farklı tip destek yapısı tipleri (Krol ve ark. 2012)

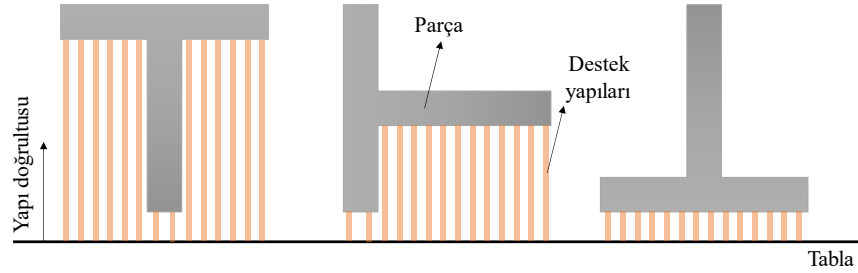
Destek yapılarının proses ve parça üzerindeki etkilerini belirlemek için literatür incelenmiştir. Destek yapılarının tasarımı üretilen parçanın yüzey kalitesine (Järvinen vd., 2014; Ö Poyraz, E Yasa, G Akbulut, A Orhangul, 2015; Thakare vd., 2020), parçada oluşacak kalıntı gerilmelere (Baskett, 2017; Höller vd., 2019; Mishurova vd., 2018), parçanın geometrik doğruluğuna ve mikro yapısına (Thakare, 2020) etki etmektedir. Destek yapıları üretim sırasında oluşan sıcaklık dağılımına da etki etmektedir (Leary vd., 2019; Paggi vd., 2019). Destek yapıları tasarlanırken aşağıdaki unsurlar göz önünde bulundurulmalıdır.

- Destek yapıları ve parça yüzeyi arasındaki bağlantı, desteğin kolayca temizlenebilmesi için olabildiğince az mukavemetli olmalıdır.
- Destek yapıları ve parça yüzeyi arasındaki bağlantının temas alanı, yüzey pürüzlülüğüne etkisini en aza indirmek için olabildiğince az olmalıdır.
- Destek yapıları ve parça yüzeyi arasındaki bağlantı çarpılmaları önleyebilecek kadar mukavemetli olmalıdır.
- Metal malzeme kullanan proseslerde, kalıntı gerilme ve termal çarpılmalar değerlendirilmelidir. Bu etkileri belirlemek için proses simülasyonları gerçekleştirilmelidir.
- Destek yapılarının ısı transferine etkisi incelenmelidir.

## 2.8. Yapı Oryantasyonu

Eklemeli imalat prosesinde parça üretilmeden önce bir takım işlemin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yapı oryantasyonu bu işlemler arasında en önemli aşama olarak gösterilebilir. Yapı oryantasyonu direkt olarak destek yapısı miktarını, üretim süresini, üretim maliyetini, parçanın yüzey kalitesini, geometrik doğruluğunu ve mekanik özelliklerini etkilemektedir (Taufik & Jain, 2013). Şekil 2.33'te örnek bir parçanın farklı

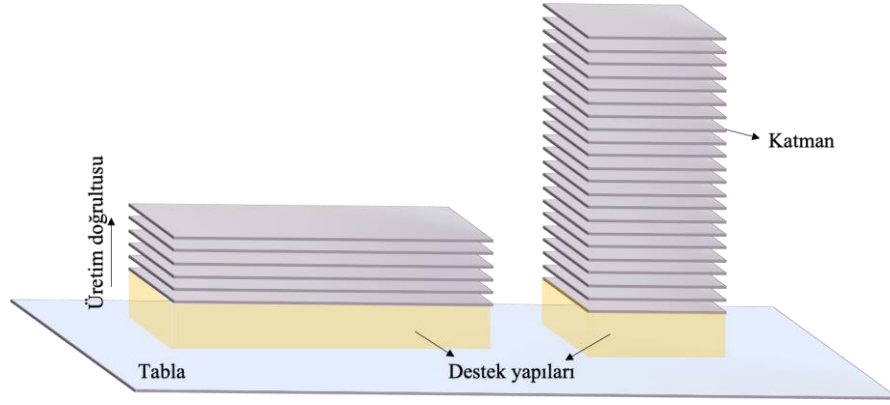
yapı oryantasyonu için destek yapısı gereksinimi şematik olarak gösterilmiştir. Parça döndürüldüğünde yüzeylerin tabla ile yaptığı açı değişmektedir. Bu açıya bağlı olarak destek yapısı gereksinimi de değişmektedir. Şekil 2.33'te birinci yapı oryantasyonunda ilgili parça için üçüncü yapı oryantasyonuna göre çok daha fazla destek yapısı kullanılması gerektiği görülmektedir.



**Şekil 2.33.** Yapı oryantasyonunun destek yapısı gereksinimine etkisi

Farklı eklemeli imalat proseslerinde üretim süresini etkileyen parametreler farklılık göstermektedir. Ancak üretim süresini yapı oryantasyonu sonucunda etkileyen iki parametre bulunmaktadır. Bunlardan ilki destek yapısı hacmi, ikincisi ise parçanın üretim doğrultusundaki boyudur. Destek yapılarının üretilmesi için de hammadde ve enerji kullanılmaktadır. Bu nedenle üretilmek istenen toplam hacim parça hacmi ve destek yapısı hacminin toplamıdır. Parça hacmi yapı oryantasyonuyla değişmemektedir. Ancak destek yapısı miktarı ne kadar çoksa üretimi için de o kadar fazla zaman gerekmektedir.

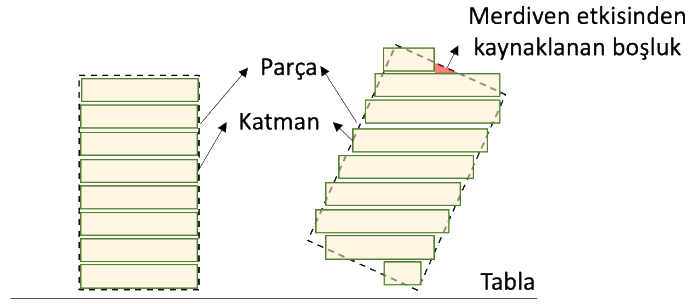
Şekil 2.34'te aynı parçanın farklı oryantasyonlardaki üretimi incelenmiştir. Şeklin sol tarafında bulunan yapı oryantasyonunda, sağ taraftakine oranla daha fazla destek yapısı kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle üretim süresinin daha fazla olacağı öngörülebilir. Ancak parçanın üretim doğrultusundaki boyunun da üretim süresini etkilediği unutulmamalıdır. Şeklin sağ tarafında bulunan yapı oryantasyonunda ise üretim doğrultusundaki boyun daha fazla olduğu görülmektedir. PBF prosesinin çalışma prensibine göre her üretim adımında yeni toz katmanının serilmesi için zaman harcanmaktadır. Üretim doğrultusundaki parça boyu ne kadar fazlaysa toz sermek için harcanan süre o kadar fazla olacaktır. Bu durumda da şeklin sağ tarafında bulunan yapı oryantasyonunda üretim süresinin daha fazla olacağı düşünülebilir. Üretim süresini belirleyebilmek için destek yapısı miktarı ve üretim doğrultusundaki maksimum boyun eş-zamanlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 2.34.** Aynı parçanın farklı yapı oryantasyonlarında gösterimi

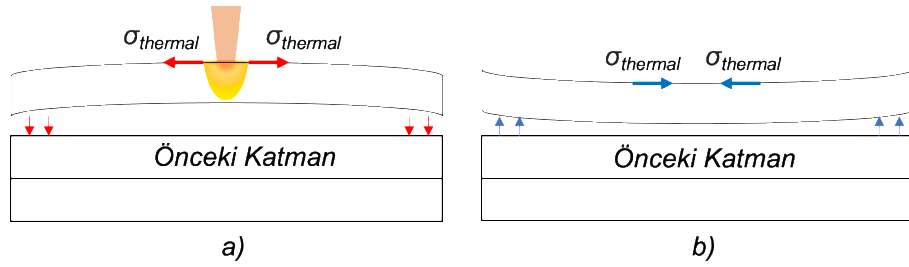
Üretim maliyeti ise üretim süresine benzer şekilde parça hacmi, destek yapısı hacmi, üretim süresi ve üretim sonrası işlemlere bağlıdır. Parça hacminin sabit olduğu göz önünde bulundurulduğunda yapı oryantasyonundan etkilenen destek yapısı hacmi ve üretim süresi, üretim maliyetini belirlemektedir. Destek yapılarını üretilirken kullanılan hammadde miktarı, parçanın ve destek yapılarının üretilmesi için harcanan enerji ve zaman temel maliyetleri oluşturmaktadır. Ayrıca destek yapılarının temizlenmesi ve parça kalitesini artırmak için gerçekleştirilen uygulamalar gibi üretim sonrası işlemler de maliyeti artırmaktadır.

Eklemeli imalat ile parça katman üzerine katman inşa edilerek üretim gerçekleştirilir. Bu nedenle Şekil 2.35’de görülen merdiven etkisi (*staircase effect*) meydana gelmektedir (Taufik & Jain, 2013). Merdiven etkisi üretilmek istenen parçanın yüzey kalitesini ve hacimsel doğruluğunu etkilemektedir. Ayrıca dilimleme işleminden kaynaklanan Şekil 2.12’deki kapsama problemi ile birleşmektedir. Aynı parçanın iki farklı yapı oryantasyonu Şekil 2.35’te incelenmiştir. Sol taraftaki yapı oryantasyonunda merdiven etkisi oluşmadığı görülmektedir. Ancak sağ taraftaki yapı oryantasyonunda parça tabla ile belirli bir açı yapacak şekilde yerleştirildiği için bazı boşluklar oluşmaktadır. Oluşan bu boşluklar parçanın yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Ayrıca hacimsel bir hataya da neden olmaktadır. Katman kalınlığı bu etki üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Katman kalınlığı azaltılarak bu hata en aza indirgenebilir. Destek yapıları da parçanın yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemektedir. Üretim sonrasında parça üzerinden koparılan destek yapıları bağlı olduğu yüzey kalitesini bozmaktadır. Bu nedenle genellikle destek yapıları temizlendikten sonra yüzey kalitesini artırmak için fazladan işlem gerekmektedir.



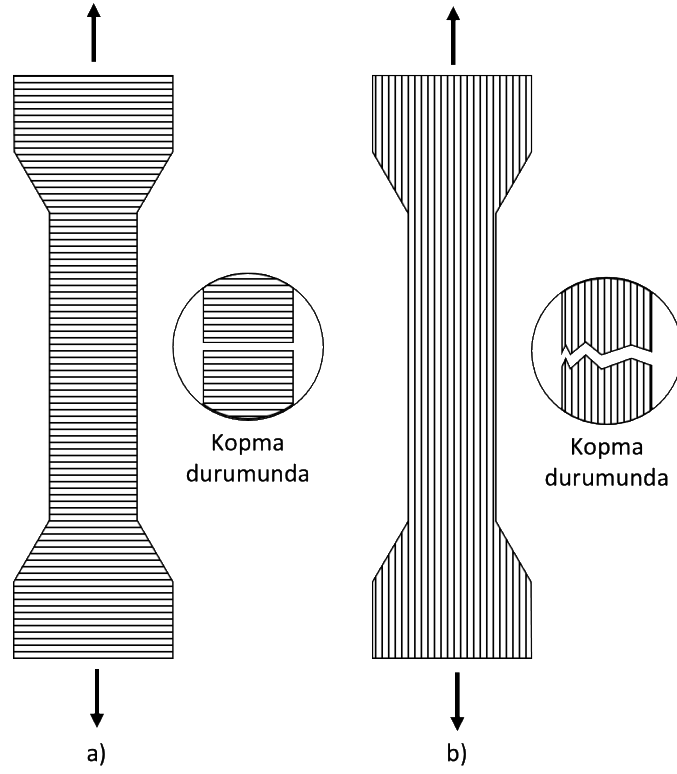
**Şekil 2.35.** Merdiven etkisi

PBF gibi yüksek sıcaklık girişinin olduğu proseslerde termal etkilerden kaynaklanan bazı hatalar meydana gelebilmektedir (Şekil 2.36). Bu hataları engellemek için farklı tarama stratejileri ve destek yapıları kullanılmaktadır. Yapı oryantasyonu sonucu oluşan katman alanlarının büyüklüğü ve üretim doğrultusu boyunca dağılımının da geometrik doğruluk üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu etki ilerleyen kısımlarda daha detaylı incelenecektir.



**Şekil 2.36.** a) ısı girişinden kaynaklanan çarpılma ve b) soğumadan kaynaklanan çekme

Eklemeli imalat prosesinde üretilmek istenen parça belirlenen yapı oryantasyonunda dilimlenerek katmanlara bölünmektedir. Bu katmanların parça geometrisi içerisindeki dağılımı nedeniyle parçanın mekanik özellikleri her doğrultuda eşit olmamaktadır. Şekil 2.37’de iki farklı yapı oryantasyonu ile üretilmiş aynı geometriye sahip parçalar görülmektedir. Şekil 2.37a’da katmanlar uygulanan kuvvete dik olacak şekilde dağılım göstermektedir. Bu nedenle parçada oluşacak hasarın katmanların birbirinden ayrılmasından kaynaklanması beklenmektedir. Şekil 2.37b’de ise katman dağılımı uygulanan kuvvet ile aynı yönde dağılım göstermiştir. Bu nedenle 0° yapı oryantasyonu ile üretilen parçanın, ilgili koşullarda, yük taşıma kapasitesi daha yüksektir. FDM gibi proseslerde bu etki PBF proseslerine göre çok daha önemlidir.



**Şekil 2.37.** a) 90° yapı oryantasyonunda üretilmiş parça ve b) 0° yapı oryantasyonunda üretilmiş parça

## 2.9. Eklemeli İmalat Proses Simülasyonu

Birçok farklı mühendislik yazılımına entegre edilen eklemeli imalat modülleri ve yalnızca eklemeli imalat prosesleri için geliştirilen yazılımlar bulunmaktadır. Bu yazılımlar farklı eklemeli imalat prosesleri ile üretilmek istenen parçaların üretim öncesi hazırlık işlemlerinin ve proses simülasyonunun yapılmasına olanak sağlamaktadır. Araştırmacılar bu araç setlerini kullanarak, üretilebilirliği etkileyen süreç veya proses değişkenlerini inceleyebilirler, malzeme kullanımını, üretim süresini ve işlem sonrası süreçleri değerlendirebilirler. Metal eklemeli imalat prosesleri için kullanılan bazı yazılımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Siemens NX (Siemens PLM Software, 2020)
- Altair Inspire (Altair, 2019)
- Simufact Additive (Hexagon, 2019)
- ANSYS Additive Print (ANSYS, 2021)

- Simulia (3DS, 2017)
- Materialise Magics (Materialise, 2018)
- Autodesk NETFABB (Autodesk, 2020)
- GENOA 3DP (AlphaSTAR, 2019)
- GEONX (Skywin, 2019)

Lazer ile Toz Yatağı Füzyonu (*Powder Bed Fusion by Laser*, PBF-L) proseslerindeki sürekli ve tekrarlı ısınma ve soğuma mekanizması sebebiyle bu değerlendirmeler termo-mekanik analizler ile mümkün olmaktadır. Termo-mekanik analizlerin gerçekleştirilmesiyle üretim aşamaları, üretim sonrası uygulanacak ısıl işlemler ve parçanın tabladan ayrılması sonucunda oluşacak geri yaylanmalar benzetimsel olarak incelenebilir. Sonuç olarak ortaya çıkacak ürünün ısıl durumu, parçada oluşacak kalıntı gerilmeler ve parçada meydana gelebilecek çarpılmalar elde edilebilir.

Literatürde birçok araştırmacı metal malzeme ile üretim gerçekleştirilen PBF proseslerini modellemek ve proses simülasyonlarının gerçekleştirilmesi için çalışmalar gerçekleştirmiştir (King vd., 2015).

## **2.10. Optimizasyon Yöntemleri**

Optimizasyon bir amaç veya amaçlar için bazı kısıtlar altında en uygun çözümün elde edilmesi sürecidir. Geçmişte tanımlanan problemlerin çözümü için doğrusal ve az sayıda değişkenin kullanıldığı bazı matematiksel modeller oluşturulmuştur. Ancak bu matematiksel modellerin her problem için uygulanamayacağı anlaşılacak doğrusal olmayan modelleme üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Böylece, evrim kuramındaki gibi, en iyinin hayatta kalması ve doğal seçim stratejileri kullanılan evrimsel algoritmalar geliştirilmiştir.

Bir amacın en iyi olduğu çözüm aranıyorsa problem tek-amaçlı optimizasyondur. Birden fazla amaç göz önünde bulunduruluyorsa problem çok-amaçlı optimizasyondur. Tek-amaçlı optimizasyonda problemin bir amaç doğrultusunda en iyi olan tek bir çözümü aranır. Ancak çok-amaçlı optimizasyonda amaçlar doğrultusunda en iyi olan tek bir çözüm olmayabilir. Bu nedenle tüm amaçlar değerlendirilerek uzlaşma sağlanan bir



çözüm kümesi bulunması hedeflenir. Optimizasyon sonucunda alternatif çözümleri içeren birçok sonuç elde edilmiş olur.

Bu başlık altında tek-amaçlı ve çok-amaçlı optimizasyon yöntemlerine genel bir bakış sunulacaktır. Tez kapsamında kullanılan NSGA-II algoritması ise detaylıca incelenecektir.

### 2.10.1. Tek-amaçlı optimizasyon

Bir tek-amaçlı optimizasyon problemi Denklem (2.1)'de görüldüğü gibi amaç fonksiyonundan ve kısıtlardan meydana gelmektedir. Amaç fonksiyonu  $i$  tane değişkene bağlıdır. Burada hedef, kısıtlar dahilinde kalarak amaç fonksiyonunun en iyi olduğu karar değişkenlerini belirlemektir.

Minimize/Maksimize  $f(x)$

s.t.  $g_j(x) \leq 0$

(2.1)

$h_k(x) = 0$

$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$

Burada,  $f$  amaç fonksiyonunu,  $g_j$  ve  $h_k$  ise kısıt olarak yer alan eşitsizlikleri ve eşitlikleri göstermektedir.  $x_i$  karar değişkenlerini,  $x_i^L$  ve  $x_i^U$  ise karar değişkenlerinin alabilecekleri en yüksek ve en düşük değerleri temsil etmektedir.

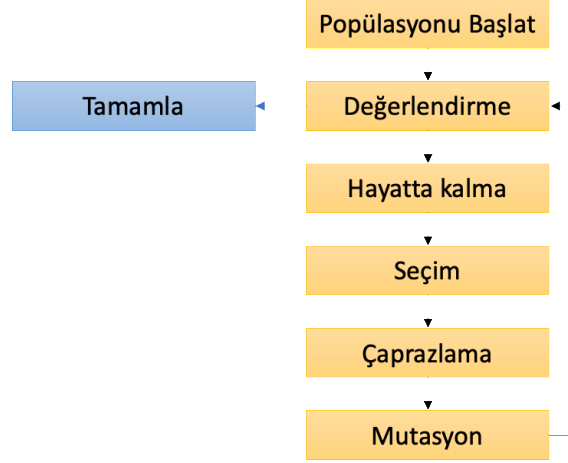
Çözüm sırasında  $x_i$  değerlerinin her birine çözüm denir. Tüm kısıtlamaları sağlayan çözüm ise uygun çözüm olarak adlandırılır. Amaç fonksiyonunu minimum/maksimum yapan çözüm ise optimal çözüm olarak adlandırılır. Bazı optimizasyon problemlerinde ise hiç kısıt olmayabilir.

Lineer olmayan problemleri çözmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (*Particle Swarm Optimization*, PSO), Diferansiyel Gelişim (*Differential Evolution*, DE) ve Benzetimli

Tavlama (*Simulated Annealing*, SA) gibi birçok global optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi de biyolojik süreci temel olarak amaç fonksiyonunu optimize eden Genetik Algoritma'dır (*Genetic Algorithm*, GA). GA'lar ilk defa 1975 yılında John Holland tarafından "Adaptation in Natural and Artificial Systems" başlıklı kitabında sunulmuştur. Bu algoritmada kullanılan parametreler biyolojideki genleri, bu parametrelerin toplu kümesi de kromozomu temsil etmektedir. Yani her bir aday çözüm bir kromozomdur. Aday çözümlerin oluşturduğu küme popülasyon olarak adlandırılmıştır. Her yeni nesil rasgele bilgi değişimi ile oluşturulan bireyler içerisinde hayatta kalanların birleştirilmesi ile elde edilmektedir.

GA'nın temel çalışma prensibi Şekil 2.38'deki gibidir ve altı adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar aşağıdaki gibi açıklanabilir.

1. **Popülasyonu başlat:** İlk olarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulur.
2. **Değerlendirme:** Çözülmek üzere tanımlanan problem kullanılarak popülasyon sınanır.
3. **Hayatta kalma:** Genellikle bu adım kullanılan genetik algoritmanın çekirdeğidir. Basit bir tek-amaçlı genetik algoritmada bireyler uygunluklarına göre sıralanabilir ve en uygun olanın hayatta kalması sağlanabilir.
4. **Seçim:** Çaprazlama sürecinden önce bireylerin çiftleşmeye katılmak için seçilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yüksek uygunluk gösteren bireyler yeniden üretilirken, düşük uygunluğa sahip bireyler popülasyondan çıkarılır. Farklı türde seçimler algoritmanın yakınsamasını artırabilir.
5. **Çaprazlama:** Ebeveynler seçildikten sonra çiftleşme yapılır. Bir çaprazlama operatörü, ebeveynleri bir veya birkaç yavru halinde birleştirir. Çiftleşmeyi gerçekleştirmek için genellikle değişken sınırları gibi bilgilere ihtiyaç vardır. Özelleştirilmiş problemler için mevcut nesil, popülasyonun çeşitlilik ölçümü gibi daha fazla bilgiye de ihtiyaç duyulabilir.
6. **Mutasyon:** Çaprazlama yoluyla yavrular oluştuktan sonra gerçekleştirilir. Genellikle mutasyon önceden tanımlanmamış çok düşük bir olasılık yüzdesi ile yürütülür. Bu operatör popülasyondaki çeşitliliği artırmaya yardımcı olur.



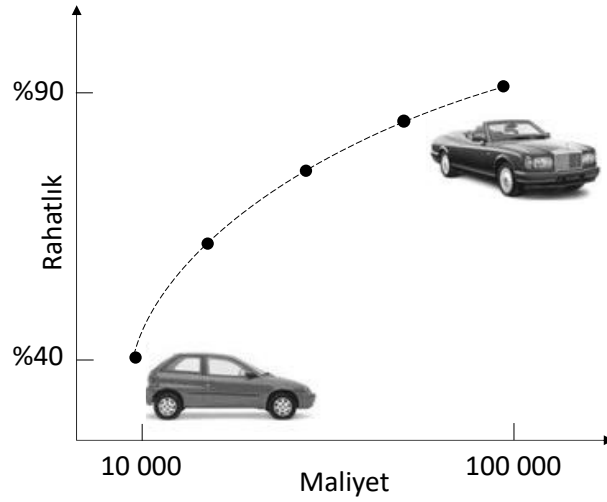
**Şekil 2.38.** Genetik algoritmanın temel çalışma prensibi

Yukarıda açıklanan kavramlar ile evrim iteratif olarak simüle edilir. Hesaplama işlemi bir sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

GA'ların avantajları sürekli ve ayrık parametreleri optimize edebilmesi, türevsel bilgiler gerektirmemesi, amaç fonksiyonunu geniş bir spektrumda araştırması, paralel bilgisayarlar kullanılarak çalıştırılabilmesi, karmaşık amaç fonksiyonlarını yerel optimum veya minimuma yakılmadan optimize edebilmesi olarak sıralanabilir. GA'lar sezgisel yöntemlerdir ve her zaman en iyi çözümü bulamayabilirler. Ayrıca her çözümde aynı sonuca ulaşamayabilirler.

### 2.10.2. Çok-amaçlı optimizasyon

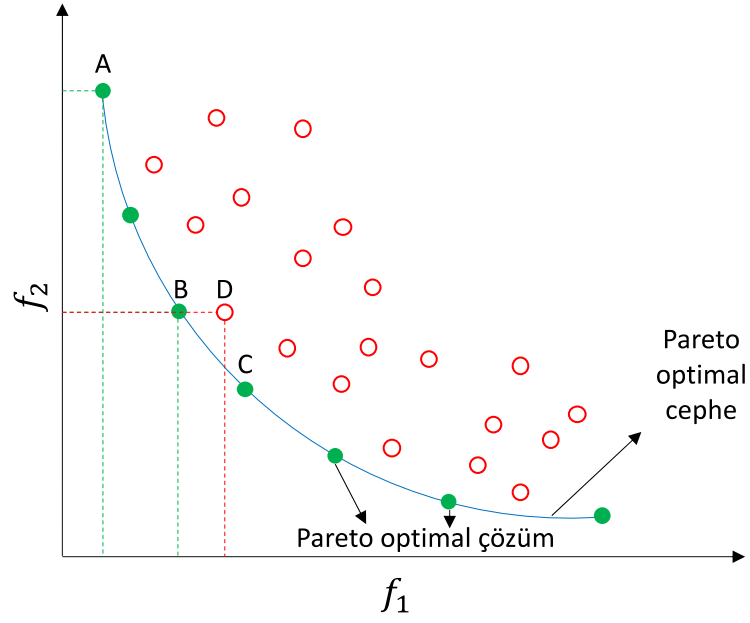
Gerçek dünyada karşılaşılan problemlerde genellikle birden fazla ve birbiri ile çelişen amaçların optimize edilmesi istenmektedir. Şekil 2.39'da gösterilen araç seçim süreci, çok-amaçlı optimizasyon problemine örnek olarak gösterilebilir. Bu problemde hem rahatlık hem maliyet amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonları birbiriyle çeliştiği için eş-zamanlı optimizasyon gereklidir. Bu nedenle tüm amaçlara göre en iyi olan tek bir çözüm mevcut olmayabilir. Bunun yerine her iki amaç fonksiyonu için de uzlaşmış sonlu bir çözüm kümesi elde edilmektedir. Çözüm bu alternatifler içerisinde bir karar verme mekanizması ile seçilmektedir.



**Şekil 2.39.** Çok-amaçlı optimizasyon probleminin bir örneği (Deb ve Deb 2014'den değiştirilerek alınmıştır)

Pareto optimal kavramı çok-amaçlı optimizasyon konusunda oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu kavram iktisatçı ve sosyal bilimci olan Vilfredo Pareto tarafından, bir ulusun ekonomisindeki denge durumlarını incelerken ortaya atılmıştır ve adını buradan almaktadır. Oluşturulan teoride hiç kimsenin durumu kötüleşmeden bazı kişilerin durumu iyileşiyorsa refah artmış sayılmaktadır. Eğer hiç kimsenin durumu kötüleşmeden bir kişinin dahi durumu iyileşmiyorsa refah maksimuma ulaşmış sayılmaktadır.

Pareto-optimal kavramı çok-amaçlı evrimsel optimizasyon algoritmalarına uyarlanmıştır (Şekil 2.40). Pareto optimal çözüm herhangi başka bir çözüm tarafından baskılanamayan çözümdür. Şekil 2.40'ta verilen A, B ve C çözümleri Pareto optimal çözüme örnek olarak gösterilebilir. D çözümü ise B ve C tarafından baskılanmaktadır. Bu baskılanamayan Pareto optimal çözümler ise Pareto optimal cepheyi oluşturmaktadır. Çok-amaçlı evrimsel algoritmaların hedefi genellikle Pareto optimal cepheyi tespit etmektir. Bu cephede yer alan Pareto optimal çözümlerden herhangi birisi çözüm olarak kabul edilebilmektedir. Çözüm genellikle bir karar verme mekanizması yardımıyla tayin edilmektedir.



**Şekil 2.40.** Pareto optimal cephe örneği

Bir çok-amaçlı optimizasyon problemi Denklem (2.2)'deki gibi tanımlanmaktadır. Denklem (2.1)'de tanımlanan tek-amaçlı optimizasyon algoritmalarından farkı birden fazla amaç fonksiyonu tanımlanmasıdır. Çok-amaçlı optimizasyon problemlerinde eşitlikler ve eşitsizlikler kısıt olarak kullanılmaktadır.

$$\text{Minimize/Maksimize } f_m(x)$$

$$\text{s.t. } g_j(x) \leq 0$$

$$h_k(x) = 0$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$$

(2.2)

Çok-amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde genetik ve evrimsel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalara Vektör Değerlendirmeli Genetik Algoritma (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*, VEGA), Çok-amaçlı Genetik Algoritma (*Multi-objective Genetic Algorithm*, MOGA), Bastırılmamış Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma (*Non-*

*dominated Sorting Genetic Algorithm*, NSGA), NSGA-II, Kuvvet Pareto Evrimsel Algoritması (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, SPEA), SPEA2 ve Pareto Zarflama-Temelli Seçim Algoritması (*Pareto Envelope-based Selection Algorithm*, PESA) örnek olarak gösterilebilir.

### 2.10.3. Bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma-II

Srinivas ve Deb tarafından 1994 yılında önerilen NSGA ilk evrimsel algoritmalarından biridir (Srinivas & Deb, 1994). Ancak yıllar içerisinde NSGA yaklaşımına yönelik temel eleştiriler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Baskın olmayan sıralamanın yüksek hesaplama karmaşıklığı
- Seçkinlik eksikliği
- $\sigma_{share}$  parametre değerinin ayarlanmasındaki belirsizlik

Deb ve ark. 2002 yılında yayınladıkları çalışmada tüm bu sorunları ele alarak NSGA'nın gelişmiş bir versiyonu olan NSGA-II'yi önermişlerdir. (Deb vd., 2002). Gerçekleştirdikleri bir dizi test probleminin ardından diğer çok-amaçlı evrimsel algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamışlardır.

$N$  boyutlu bir popülasyonda ilk bastırılmamış cepheyi oluşturan çözümleri bulmak için her bir çözüm popülasyondaki diğer çözümler ile karşılaştırılabilir. Bu aşamada, ilk bastırılmamış cephedeki tüm bireyler bulunur. Bir sonraki bastırılmamış cephedeki bireyleri bulmak için ilk cephenin çözümleri geçici olarak dikkate alınmaz ve yukarıdaki işlem tekrarlanır. Hızlı baskın olmayan sıralama algoritması aşağıda tanımlanmıştır.

---

hızlı-baskın-olmayan-sıralama ( $P$ )

---

for each  $p \in P$

$$S_p = \emptyset$$

$$n_p = 0$$

for each  $q \in P$

if  $(p < q)$  then

Eğer  $p, q$ 'yu baskılırsa

$$S_p = S_p \cup \{q\}$$

else if ( $q < p$ ) then	$p$ 'nin baskın olduğu çözüm kümesine $q$ 'yu ekle
$n_p = n_p + 1$	$p$ 'nin üstünlük sayısını artır
if $n_p = 0$ then	$p$ ilk cepheye aittir
$p_{rank} = 1$	Cephe sayacını başlat
$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\}$	
$i = 1$	
while $\mathcal{F}_1 \neq \emptyset$	
$Q = \emptyset$	Bir sonraki cephenin üyelerini saklamak için kullanılır
for each $p \in \mathcal{F}_1$	
for each $q \in S_p$	
$n_q = n_q - 1$	
if $n_q = 0$ then	$q$ bir sonraki cepheye aittir
$q_{rank} = i + 1$	
$Q = Q \cup \{q\}$	
$i = i + 1$	
$\mathcal{F}_1 = Q$	

---

İlk olarak, her çözüm için iki varlık hesaplanmaktadır. Bunlardan ilki  $p$  çözümünü bastıran çözümlerin sayısı olan üstünlük sayısı (*domination count*)  $n_p$ , ve ikincisi ise  $p$  çözümünün bastıracağı çözümlerin kümesi olan  $S_p$ 'dir.

İlk bastırılmamış cephedeki tüm çözümlerin hakimiyetleri sıfır olarak sayılmaktadır. Sonrasında,  $n_p = 0$  olan her  $p$  çözümü için,  $S_p$  kümesinin her bir üyesi ( $q$ ) ziyaret edilmektedir ve baskınlık sayısı bir azaltılmaktadır. Bunu yaparken, herhangi bir  $q$  üyesi için üstünlük sayısı sıfır olursa, o ayrı bir  $Q$  listesine konulmaktadır. Bu üyeler ikinci bastırılmamış cepheye ait olmaktadır. Yukarıdaki işleme  $Q$ 'nun her bir üyesi için devam edilmektedir ve üçüncü cephe belirlenmektedir. Bu süreç tüm cepheler belirlenene kadar devam etmektedir.

İkinci veya daha yüksek düzeyde baskın olmama düzeyindeki her bir  $p$  çözümü için, üstünlük sayısı  $n_p$  en fazla  $N - 1$  olabilmektedir. Böylece, her  $p$  çözümü, baskınlık sayısı

sıfır olmadan önce en fazla  $N - 1$  kez ziyaret edilmektedir. Bu noktada, çözüm bastırılmamış düzeye atanmaktadır ve bir daha asla ziyaret edilmemektedir.

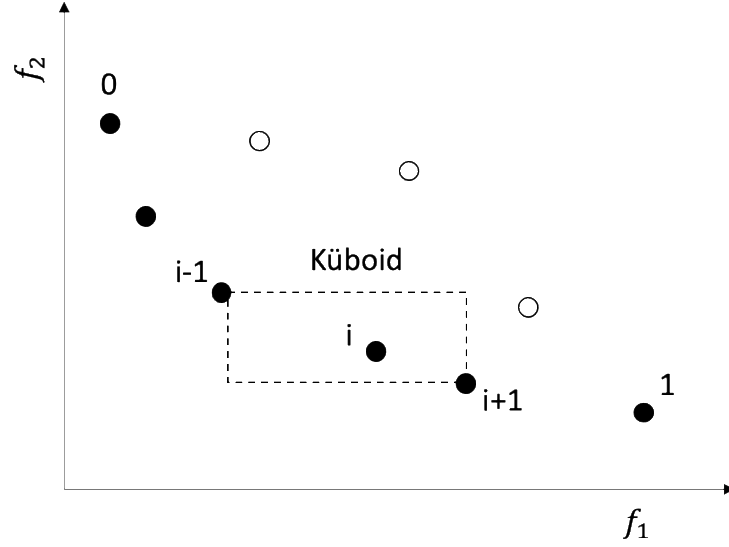
Deb ve ark. (2002) evrimsel algoritmalarda Pareto optimal kümesinin yakınsaması ile birlikte, elde edilen çözümler kümesinde iyi bir çözüm dağılımının sürdürülmesinin de istendiğini vurgulamıştır. Orijinal NSGA'da, ilgili parametrelerin uygun şekilde ayarlanmasıyla birlikte popülasyonda sürdürülebilir çeşitliliği koruması için iyi bilinen paylaşım işlevi yaklaşımı kullanılmıştır. Paylaşım fonksiyonu yöntemi, bir problemde istenen paylaşımın kapsamını ayarlayan bir paylaşım parametresi olan  $\sigma_{share}$ 'yi içermektedir. Bu parametre, iki popülasyon üyesi arasındaki yakınlık ölçüsünü hesaplamak için seçilen mesafe ölçüsü ile ilgilidir.  $\sigma_{share}$  parametresi, herhangi iki çözümün birbirinin uygunluğunu paylaştığı uzaklık ölçüsünün en büyük değerini belirtmektedir. Bu parametre, bazı yönergeler olmasına rağmen genellikle kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Bu paylaşım işlevi yaklaşımında iki zorluk bulunmaktadır. Bunlardan ilki çözümlerin yayılmasını sürdürmede kullanılan paylaşım fonksiyonu yönteminin performansının, büyük ölçüde seçilen  $\sigma_{share}$  değerine bağlı olmasıdır. İkincisi ise her çözümün popülasyondaki diğer tüm çözümlerle karşılaştırılması gerektiğinden, paylaşım fonksiyonu yaklaşımının genel karmaşıklığının yüksek olmasıdır.

NSGA-II'de, paylaşım işlevi yaklaşımı, yukarıdaki her iki zorluğu da bir dereceye kadar ortadan kaldıran bir kalabalık karşılaştırma yaklaşımıyla değiştirilmiştir. Yeni yaklaşım, popülasyon üyeleri arasında çeşitliliği korumak için herhangi bir kullanıcı tanımlı parametre gerektirmemektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşım daha iyi bir hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Bu yaklaşımda yoğunluk tahmin metriği ve kalabalık karşılaştırma operatörü kullanılmaktadır.

Popülasyondaki belirli bir çözümü çevreleyen çözümlerin yoğunluğunun bir tahminini elde etmek için, her bir hedef boyunca bu noktanın her iki tarafındaki iki noktanın ortalama mesafesini hesaplanmaktadır.  $i_{distance}$ , köşeler olarak en yakın komşular kullanılarak oluşturulan küboidin çevresini tahmin etmektedir ve kalabalık-mesafesi (*crowding-distance*) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.41'de görüldüğü üzere, içi dolu



daireler ile gösterilen cephenin  $i$ 'nci bireyinin kalabalık-mesafesi, kesikli çizgiler ile gösterilen küboidin ortalama kenar uzunluğudur.



**Şekil 2.41.** Kalabalık-mesafesi hesaplaması (Deb ve ark. 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

Kalabalık-mesafe hesaplaması, popülasyonun artan büyüklük sırasına göre her bir amaç fonksiyonu değerine göre sıralanmasını gerektirmektedir. Daha sonra, her bir amaç fonksiyonu için, sınır çözümlerine (en küçük ve en büyük fonksiyon değerlerine sahip çözümler) bir sonsuz uzaklık değeri atanmaktadır. Diğer tüm ara çözümlere, iki bitişik çözümün fonksiyon değerlerindeki mutlak normalleştirilmiş farka eşit bir uzaklık değeri atanmaktadır. Bu hesaplama diğer amaç fonksiyonları ile devam edilmektedir. Genel kalabalık-mesafe değeri, her bir amaca karşılık gelen bireysel mesafe değerlerinin toplamı olarak hesaplanmaktadır. Her bir amaç fonksiyonu, kalabalık mesafesini hesaplamadan önce normalize edilmektedir. Aşağıda verilen algoritma, baskın olmayan bir küme olan  $\mathcal{J}$ 'daki tüm çözümlerin kalabalık-mesafe hesaplama prosedürünü özetlemektedir.

---

kalabalık-mesafe-atama ( $\mathcal{J}$ )

---

$l = |\mathcal{J}|$

$\mathcal{J}$ 'daki çözüm sayısı

for each  $i$ , set  $\mathcal{J}[i]_{distance} = 0$

Mesafeyi başlat

for each objective  $m$

$J = \text{sort}(J, m)$	Sınır noktaları her zaman diğer tüm noktalar
$J[1]_{distance} = J[l]_{distance} = \infty$	için seçilecek şekilde her bir amaç değerini
for $i = 2$ to $(l - 1)$	kullanarak sırala
$J[i]_{distance} = J[i]_{distance} + (J[i + 1].m - J[i - 1].m) / (f_m^{max} - f_m^{min})$	

---

Burada  $J[i].m$ ,  $J$  kümesindeki  $i$ 'inci bireyin  $m$ 'inci amaç fonksiyonu değerini ifade eder ve  $f_m^{max}$  ve  $f_m^{min}$  parametreleri,  $m$ 'inci amaç fonksiyonunun maksimum ve minimum değerleridir.

$J$  kümesindeki tüm popülasyon üyelerine bir mesafe metriği atandıktan sonra, iki çözüm yakınlık dereceleri açısından diğer çözümlerle karşılaştırılmaktadır. Bu mesafe ölçüsünün daha küçük bir değerine sahip bir çözüm, bir anlamda diğer çözümler tarafından daha kalabalıktır. Bu, aşağıda açıklanan kalabalık-karşılaştırma operatöründe tam olarak karşılaştırılan şeydir. Şekil 2.41'de, iki hedef için kalabalık-mesafe hesaplaması gösterilse de prosedür ikiden fazla hedefe de uygulanabilir.

Kalabalık karşılaştırma operatörü ( $<_n$ ), algoritmanın çeşitli aşamalarındaki seçim sürecini eşit olarak yayılmış bir Pareto-optimal cepheye doğru yönlendirmektedir. Popülasyondaki her  $i$  bireyinin iki özelliği olduğunu varsayılmaktadır:

- 1- Bastırılmamışlık derecesi ( $i_{rank}$ );
- 2- Kalabalık-mesafesi ( $i_{distance}$ ).

$<_n$  için aşağıdaki gibi kısmi bir düzen tanımlanmıştır.

$$i <_n j \text{ if } (i_{rank} < j_{rank})$$

$$\text{or } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_{distance} > j_{distance}))$$

Yani, farklı bastırılmamışlık derecelerine sahip iki çözüm arasında, daha düşük (daha iyi) dereceli çözüm tercih edilmektedir. Her iki çözüm de aynı cepheye aitse, daha az kalabalık bir bölgede bulunan çözüm tercih edilmektedir.

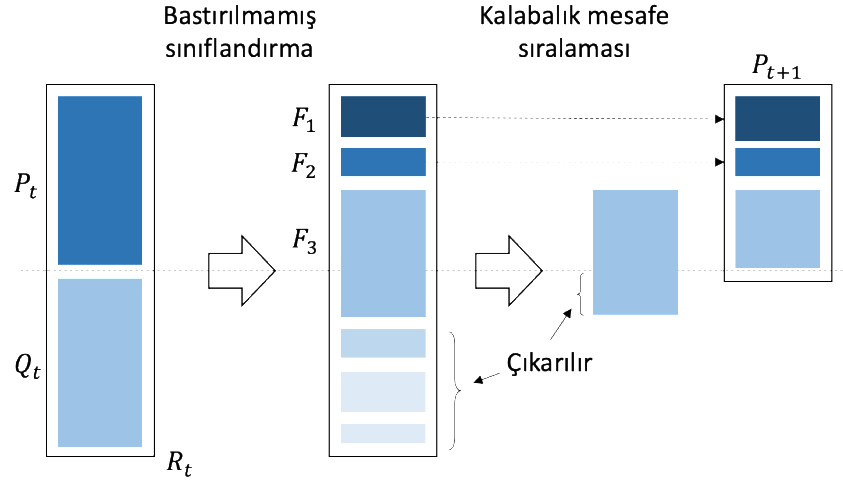
Hızlı bir baskın olmayan sıralama prosedürü, hızlı bir kalabalık-mesafe tahmin prosedürü ve basit bir kalabalık-karşılaştırma operatörü olmak üzere üç yöntem ile NSGA-II algoritmasının ana döngüsü aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Başlangıçta, rastgele bir  $P_0$  ebeveyn popülasyonu oluşturulmaktadır. Nüfus, bastırılmamışlığa göre sıralanmaktadır. Her çözüme, baskın olmama düzeyine eşit bir uygunluk (veya derece) atanmaktadır (1 en iyi düzey, 2 bir sonraki en iyi düzey vb.). İlk başta,  $N$  boyutunda bir  $Q_0$  yavru popülasyonu oluşturmak için doğal ikili turnuva seçimi, yeniden birleşme ve mutasyon operatörleri kullanılmaktadır. Seçkinlik işlemi, mevcut popülasyonu önceden bulunan en iyi baskın olmayan çözümlerle karşılaştırarak belirlediğinden, uygulama ilk nesilden sonra farklılaşmaktadır. NSGA-II algoritmanın  $t$ 'inci nesli aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$R_t = P_t \cup Q_t$	Ebeveyn ve yavru popülasyonu birleştirme
$\mathcal{F} = \text{hızlı-baskın-olmayan-sıralama}(R_t)$	$\mathcal{F} = (\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots)$ $R_t$ 'nin tüm baskın olmayan cepheleri
$P_{t+1} = \emptyset$ and $i = 1$	
until $ P_{t+1}  +  \mathcal{F}_i  \leq N$	Ebeveyn nüfusu dolana kadar $\mathcal{F}_i$ 'de kalabalık-mesafesini hesapla
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i$	baskın olmayan cepheyi ebeveyn popülasyona dahil et dahil etmek için bir sonraki cepheyi kontrol et
$i = i + 1$	
Sort $(\mathcal{F}_i, \prec_n)$	$\prec_n$ kullanarak azalan düzende sırala
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i[1:(N -  P_{t+1} )]$	$\mathcal{F}_1$ 'in ilk $(N -  P_{t+1} )$ öğelerini seç
$Q_{t+1} = \text{make-new-pop}(P_{t+1})$	$Q_{t+1}$ yeni popülasyonunu oluşturmak için seçim, çaprazlama ve mutasyon kullan
$t = t + 1$	Nesil sayacını artır

İlk olarak, birleşik bir  $R_t = P_t \cup Q_t$  popülasyonu oluşturulmaktadır.  $R_t$  popülasyonu,  $2N$  büyüklüğündedir. Daha sonra  $R_t$  popülasyonu, baskın olmama durumuna göre sıralanmaktadır. Önceki ve mevcut tüm popülasyon üyeleri  $R_t$ 'ye dahil edildiğinden seçkinlik sağlanmaktadır. En iyi baskın olmayan  $\mathcal{F}_1$  kümesine ait çözümler, birleşik popülasyondaki en iyi çözümlerdendir ve birleşik popülasyondaki diğer tüm çözümlerden

daha fazla vurgulanmalıdır.  $\mathcal{F}_1$ 'in boyutu  $N$ 'den küçükse, yeni popülasyon  $P_{t+1}$  için  $\mathcal{F}_1$  kümesinin tüm üyelerini kesinlikle seçilmektedir.  $P_{t+1}$  popülasyonunun geri kalan üyeleri, sıralama sırasına göre daha sonraki baskın olmayan cephelerden seçilmektedir. Yani,  $\mathcal{F}_2$  kümesinden, ardından  $\mathcal{F}_3$  kümesinden çözümler seçilmektedir ve bu şekilde devam edilmektedir. Bu işlem,  $P_{t+1}$  popülasyonu doluncaya kadar devam ettirilmektedir. Genel olarak,  $\mathcal{F}_1$ 'den  $\mathcal{F}_1$ 'e kadar olan tüm kümelerdeki çözümlerin sayısı, popülasyon boyutundan daha büyük olmaktadır. Tam olarak  $N$  popülasyon üyesi seçmek için,  $\prec_n$  kalabalık-karşılaştırma operatörü kullanarak son cephe  $\mathcal{F}_1$ 'in çözümleri azalan düzende sıralanmaktadır ve tüm popülasyon boşluklarını (*slot*) doldurmak için gereken en iyi çözümler seçilmektedir. NSGA-II prosedürü Şekil 2.42'de gösterilmiştir.  $N$  boyutundaki yeni  $P_{t+1}$  popülasyonu,  $N$  boyutunda yeni bir  $Q_{t+1}$  popülasyonu oluşturmak üzere seçim, çaprazlama ve mutasyon için kullanılmaktadır. Kalabalık-karşılaştırma operatörü  $\prec_n$ 'i seçim kriteri olarak temel alan bir ikili turnuva seçim operatörü kullanıldığı unutulmamalıdır. Bu operatörde popülasyondaki her çözümün hem seviyesi hem de kalabalık-mesafesi gerektiğinden,  $P_{t+1}$  popülasyonu oluşturulurken bu miktarlar hesaplanmaktadır.



**Şekil 2.42.** NSGA-II prosedürü (Deb ve ark. 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

Tüm algoritmada kullanılan temel işlemler ve en kötü durum karmaşıklıkları aşağıdaki gibi verilmiştir.

1. Baskılanmamış sıralama:  $O(M(2N)^2)$
2. Kalabalık-mesafe ataması:  $O(M(2N) \log(2N))$

3.  $\prec_n$ 'ye göre sıralama:  $O(2N \log(2N))$

Algoritmanın genel karmaşıklığı  $O(MN^2)$  olarak belirlenmiştir ve algoritmanın baskın olmayan sıralama kısmı bunda etkin rol oynamaktadır. Dikkatli bir şekilde gerçekleştirilirse,  $2N$  büyüklüğündeki popülasyonun tamamının baskın olmama durumuna göre sıralanmasına gerek yoktur. Sıralama prosedürü  $P_{t+1}$ 'de  $N$  üyeye sahip olmak için yeterli sayıda cephe çözümü bulunduğunda, sıralama prosedürüne devam etmek için hiçbir sebep yoktur.

### 2.11. Yapı Oryantasyonunun Optimizasyonu

Geçmişte farklı eklemeli imalat süreçlerinin farklı performansını optimize etmek, tahmin etmek veya kontrol etmek için birçok yapı oryantasyon stratejisi geliştirilmiştir. Araştırmacıların çoğu, yüzey kalitesini en önemli faktör olarak görmüş, bunu boyutsal doğruluk, üretim süresi ve destek yapılarının miktarı izlemiştir (Alexander vd., 1998; Byun & Lee, 2006; Di Angelo vd., 2020; Gurralla & Regalla, 2014; Jaiswal vd., 2018; Mele & Campana, 2020; Ulu vd., 2015; W. M. Wang vd., 2016; Wodziak vd., 1994). Genel olarak, bu yapı oryantasyon stratejileri birbirine göre farklılıklar göstermektedir ve hangi yöntemlerin uygulanması gerektiğine dair net bir standart bulunmamaktadır. Ayrıca araştırmacıların çalışmalarını objektif bir şekilde karşılaştırabilmeleri için literatürde standart bir parçanın olmadığı görülmektedir. Bu nedenle en iyi yaklaşımı belirlemek mümkün olmamıştır. Bu bölümde yapı oryantasyonu stratejilerine genel bir bakış sunulmuştur ve farklı sorunların çözümleri gözden geçirilmiştir.

Destek yapısının miktarı (Ga vd., 2018; Golmohammadi & Khodaygan, 2019; A. Li vd., 2010; Matos vd., 2020, 2021; Pereira vd., 2018; Phatak & Pande, 2012; Rocha vd., 2018; Yicha Zhang & Bernard, 2013) ve üretim süresi (Canellidis vd., 2009; Ga vd., 2018; Huang vd., 2018; A. Li vd., 2010; Matos vd., 2020, 2021; Rocha vd., 2018; Thrimurthulu vd., 2004) dikkate alınarak, metalik olmayan malzemeler kullanan eklemeli imalat proseslerinde optimum yapı oryantasyonunu belirlemek için literatürde bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Metalik eklemeli imalat işlemlerinde destek yapısının miktarını tahmin etmek için kullanılan yöntemler, metalik olmayan malzeme kullanan prosesler ile aynıdır. Bu nedenle, metalik malzeme kullanılmayan prosesler de bu tez kapsamında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu çalışmalarda destek yapısı miktarı belirlenirken destek

yapılarının parça ile temas ettiği yüzeylerin toplam alanı (Matos vd., 2020, 2021; Pereira vd., 2018; Phatak & Pande, 2012; Rocha vd., 2018) veya tabla üzerine yansıtıldığı alan (Ga vd., 2018; A. Li vd., 2010) kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler, destek yapısının miktarını gerçekçi bir şekilde temsil etmek için yeterli değildir. Yapı oryantasyonunun bir sonucu olarak, destek yapısı gerektiren yüzeyler, tabladan farklı yüksekliklere sahip olabilir. Bu durumda, tabladan daha yüksek bir mesafede bulunan yüzey için oluşturulacak destek yapısının hacmi diğerlerinden daha büyük olmalıdır. Ancak yüzey tabanlı yöntemler bu ayrımı yapamamaktadır. Bu nedenle, destek yapısının gerekli olduğu yüzey ile tabla arasındaki hacim de destek yapısının miktarını temsil etmek için kullanılmıştır (Golmohammadi & Khodaygan, 2019). Bu yöntem de destek yapısının miktarını tam olarak temsil etmemektedir. Çünkü bu yöntemde üretilen tüm destek yapılarının tablaya ulaşacağı öngörülmektedir. Destek yapıları, parçanın geometrisine bağlı olarak parçanın kendi geometrisi ile kesişebilir. Bu durumda destek yapısı miktarı olması gerekenden daha fazla tahmin edilmektedir. Üretim süresi aynı zamanda destek yapısının miktarına da bağlı olduğundan, optimizasyon işlemi sırasında oluşan hata kümülatif olarak artar. Daha doğru tahminler yapabilmek için destek yapılarının parçanın kendi geometrisi ile kesişimi dikkate alınmalıdır.

Metalik malzeme kullanılmayan eklemeli imalat proseslerinde yapı oryantasyonunun optimizasyonunda birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Belirli bir çözünürlükte veya geometrik özelliklere bağlı olarak alternatif yapı oryantasyonları oluşturularak çok-özellikli (*multi-attribute*) bir karar verme yöntemi tercih edilmiştir (Ga vd., 2018; Golmohammadi & Khodaygan, 2019; Yicha Zhang, Bernard, vd., 2016; Yicha Zhang, De Backer, vd., 2016; Yicha Zhang & Bernard, 2013). Geliştirilen yöntemlerle oluşturulan yapı oryantasyonu alternatiflerinden en uygun olanı, amaç fonksiyonları göz önünde bulundurularak, hızlı bir şekilde belirlenebilir. Ancak bu yaklaşımlarla global optimuma ulaşamayabilir. Literatürde global optimuma ulaşmak için GA (Canellidis vd., 2009; Phatak & Pande, 2012; Thrimurthulu vd., 2004), PSO (A. Li vd., 2010; Pereira vd., 2018), Gri Rastlantı Değerlendirme Modeli (*Gray Incidence Evaluation Model*) (Yicha Zhang, Bernard, vd., 2016; Yicha Zhang, De Backer, vd., 2016; Yicha Zhang & Bernard, 2013), Elektromanyetizma Benzeri Algoritma (*Electromagnetism-Like Algorithm*) (Rocha vd., 2018) (Matos vd., 2020) ve Gerilmiş Benzetimli Tavlama

Algoritması (*Stretched Simulated Annealing Algorithm*) (Rocha vd., 2018) gibi tek-amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, birden fazla amaç optimize edilmek istendiğinde, genellikle farklı ağırlıklarda değerlendirilmiş ve Denklem (2.3)'de görüldüğü gibi tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmüştür.

$$f = w_1f_1 + w_2f_2 + \dots + w_if_i \quad (2.3)$$

Bu denklemde  $f_i$   $i$ 'inci amacı ve  $w_i$ ,  $i$ 'inci amacın öneminin bir göstergesi olan ağırlığı temsil etmektedir. Genellikle  $f_i$ , amaçların birbirine olan üstünlüğünü ortadan kaldırmak için normalleştirilir. Optimizasyon işlemi sonucunda kullanıcı tarafından belirlenen ağırlıklara göre tek bir sonuç elde edilir. Bu yöntemle amaçlar birlikte değerlendirilebilse de bazen amaçlar birbiriyle çelişebilir. Bu nedenle, bu amaçları birbirine baskın olmayacak şekilde eş-zamanlı olarak değerlendirmek gerekmektedir. Bu problem çok-amaçlı optimizasyon algoritmaları ile ortadan kaldırılabilir (Huang vd., 2018; Matos vd., 2021). Ayrıca, çok-amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanılarak bir dizi baskın-olmayan alternatif yapı oryantasyonu elde edilebilir. Böylece yapı yönelimini geniş bir perspektiften incelemek mümkün hale gelebilir.

Yapı oryantasyonunun optimizasyonu ile ilgili çalışmaların metalik olmayan, nispeten erişilebilir eklemeli imalat prosesleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Metalik malzeme kullanılan proseslerde yapı oryantasyonunun optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır ve çalışmaların çoğu son on yılda gerçekleştirilmiştir.

Das ve ark. (2015) DMLS prosesinde parçanın belirtilen Geometrik Ölçülendirme ve Tolerans (*Geometric Dimensioning and Tolerancing, GD&T*) kriterlerini karşılarken destek yapılarının hacmini en aza indiren optimum yapı oryantasyonunu belirlemek için bir yaklaşım geliştirmiştir. Amaç fonksiyonları Siemens NX yazılımında Uygulama Programlama Arayüzü (*Application Programming Interface, API*) kullanılarak CAD modelinden çıkarılmıştır. Çalışma, Denklem (2.3)'e benzer şekilde İç Nokta Algoritması (*Inner-point Algorithm*) kullanılarak çok-nitelikli bir tek-amaçlı optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Bu nedenle optimizasyon sonucunda tek bir yapı oryantasyonu elde edilmiş ve amaçlar arasında oluşabilecek çelişki dikkate alınmamıştır. Destek

yapısının miktarı, sarkan yüzeyler ile tabla arasında kalan hacim dikkate alınarak hesaplanmıştır. Destek yapıları ile parçanın kendi geometrisi arasındaki kesişme değerlendirilmemiştir.

Morgan ve ark. (2016) destek yapısı hacmini en aza indirmek amacıyla en iyi yapı oryantasyonunu bulmak için basit, tek-amaçlı bir optimizasyon yöntemi kullanmıştır. Destek yapılarının miktarını azaltarak atık miktarını da minimize etmek için geliştirilen yaklaşımın, deneyimsiz kullanıcılar için yapı oryantasyonunu belirlemede etkili ve tutarlı bir yaklaşım sağlayabileceğini vurgulamışlardır. Destek yapıları ile parçanın kendi geometrisi arasındaki kesişim bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Tek-amaçlı optimizasyon yönteminin doğası gereği, üretim süresi veya maliyet gibi diğer parametrelerin süreç üzerindeki etkileri değerlendirilmemiştir.

Brika ve ark. (2017) PBF-L prosesinde mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülüğünü, destek yapılarının miktarını, üretim süresini ve maliyeti göz önünde bulundurarak optimum yapı oryantasyonunu belirlemek için bir yaklaşım önermişlerdir. Farklı mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü amaç fonksiyonları için deneysel veri analizi kullanılmıştır. Gerekli destek yapısı hacmini tahmin etmek için parçanın geometrik analizi yapılmıştır. Böylece üretim süresi ve maliyet için amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. GA kullanılarak çok-nitelikli bir tek-amaçlı optimizasyon problemi çözülmüştür. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, destek yapılarının hacmi, kesişme noktası dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, destek yapıları genellikle sarkan yüzeylerinin altında kalan tüm hacmi kullanılarak üretilmemektedir. Bu nedenle çalışmadaki amaç fonksiyonu için destek yapısının hacminden ziyade, destek yapısı gerektiren hacim terimini kullanmak daha uygun olacaktır. Hesaplanan değer, destek yapısı miktarını değerlendirmek için yeterli olsa da destek yapısı miktarının bir değişken olarak girdi sağladığı üretim süresinin tahmininde hataya neden olacaktır. Ayrıca, parçanın iç ve dış konturları arasındaki farklı tarama hızı ve lazer sayısı, üretim süresini hesaplamak için kullanılan tahmin modelinde değerlendirilmemiştir. Yazarlar, bir evrimsel optimizasyon algoritması olan, NSGA-II'nin kullanılmasıyla işlem süresinin iyileştirilebileceğine dikkat çekmiştir.



Cheng ve To (2019) parça üzerinde oluşan maksimum kalıntı gerilmeyi ve destek yapısı hacmini en aza indirerek optimum yapı oryantasyonunu bulmak için bir optimizasyon çalışması önermiştir. İlgili çalışmada hem kalıntı gerilmeyi hem de destek yapılarının hacmini içeren ve eş-zamanlı değerlendiren bir çok-amaçlı optimizasyon tartışılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında karmaşık geometrik özelliklere sahip bir parça üzerinde deneysel doğrulama yapılmıştır.

Griffiths ve ark. (2019) hem yapı oryantasyonunun hem de üretim hacminin doldurulmasının optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Bunun için altı farklı aşamadan oluşan Yinelemeli Tabu Arama Prosedürü (*Iterative Tabu Search Procedure*, ITSP) sunmuşlardır. ITSP'deki her aşamayı, havacılık endüstrisinden altı bileşen de dahil olmak üzere farklı geometrik özelliklere sahip 68 benzersiz geometriye dayalı 27 örnek üzerinde test etmişlerdir. Destek yapılarının hacmi amaç fonksiyonu olarak kullanılmış ve yapı oryantasyonu optimize edilmiştir. Sadece destek yapıları azaltılarak ortalama maliyette %16,2'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Çalışma sonuçları farklı ticari yazılımlarla karşılaştırılmıştır.

Nie ve ark. (2020) eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen metal parçaların konsolidasyonunu optimize etmek için bir yöntem sunmuştur. Geliştirdikleri yöntemde konsolidasyon için adaylar üretilmektedir. Bu adaylar yapı oryantasyonu ile diğer parametreler açısından da değerlendirilmektedir ve bir GA kullanılarak hangi parçaların birleştirileceği belirlenmektedir. Çalışmanın sonuçları sırasıyla minimum üretim süresi ve üretim maliyeti için ayrı ayrı sunulmuştur. Yapı oryantasyonu, destek yapılarının miktarı, üretim süresi, destek yapılarının temizlenmesi için gereken süre ve maliyet açısından değerlendirilmiştir.

Qin ve ark. (2020) PBF-L prosesinde yapı oryantasyonunu otomatik olarak belirlemek için bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntem iki adımı içermektedir. İlk olarak, PBF-L ile üretilmesi amaçlanan bir parçanın alternatif bir oryantasyonunu otomatik olarak oluşturmak için faset kümeleme tabanlı bir yaklaşım uygulanmıştır. İkinci olarak, destek yapılarının hacmi, hacimsel hata, yüzey pürüzlülüğü, üretim süresi ve üretim maliyeti dikkate alınmıştır. Üretilen her bir alternatif yapı oryantasyonu için yukarıda sıralanan faktörler belirli tahmin modelleri ile elde edilmiştir. Ağırlıklı toplam modeli, her bir

alternatif yapı oryantasyonundaki faktörlerin bir özet değerini hesaplamak için kullanılmıştır. Hesaplanan özet değerlere göre parçayı üretmek için en uygun oryantasyon seçilmiştir. Yöntemin etkinliğini göstermek için bir dizi yapı oryantasyonu için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yayınlanmıştır.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak incelendiğinde, destek yapısının ve üretim süresinin tahmin edilmesi için kullanılan yöntemlerde bazı eksiklikler tespit edilmiştir. Bu tez kapsamında, teknolojinin mevcut durumunu yansıtacak yeni tahmin yöntemleri geliştirilmiştir veya nispeten daha doğru sonuçlar elde etmek için mevcut yöntemlere eklemeler yapılarak bazı iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmaların genel olarak çok-nitelikli tek-amaçlı optimizasyon tekniklerine odaklandığı tespit edilmiştir. Bu tezde çelişen parametreleri eş-zamanlı olarak değerlendirmek için çok-amaçlı optimizasyon tekniğine odaklanılmıştır. Ayrıca literatürde yazıcı boyutlarının bir kısıt olarak değerlendirilmediği görülmektedir. Amaç fonksiyonlarına bağlı olarak optimum yapı oryantasyonunun elde edilmesi, yazıcının kapasitesi nedeniyle istenen parçanın ilgili yapı oryantasyonunda üretilebileceğini garanti etmemektedir. Bu çalışmada yazdırılabilir hacmin maksimum boyutu bir kısıtlama olarak optimizasyon problemine eklenmiştir. Böylece araştırmacıların sahip olduğu yazıcı için geçerli olan optimum yapı oryantasyonu tespit edilebilecektir.

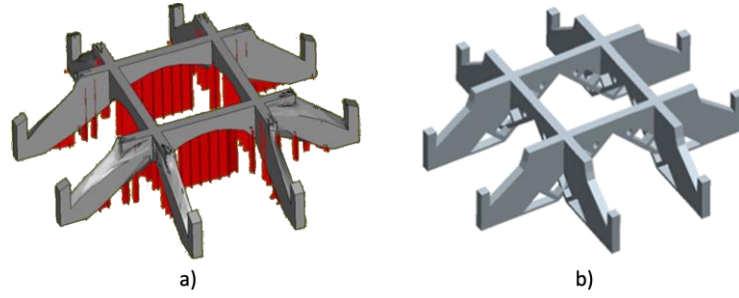
## **2.12. Destek Yapılarının Optimizasyonu**

Destek yapılarını optimize etmek için literatürde birçok yöntem kullanılmıştır. Destek yapılarının yapı oryantasyonu ile optimizasyonu ve farklı destek yapısı tipleri kullanılarak optimizasyonu önceki başlıklar altında incelenmiştir. Bu kısımda destek yapılarının optimizasyonu için kullanılan diğer yöntemler ele alınacaktır.

Bu yöntemlerden ilki yapısal bileşenlerin kendi kendini destekleyecek geometrik unsurlara sahip olacak şekilde optimize edilmesidir. Böylece destek yapısı ihtiyacı ortadan kalmaktadır veya azaltılmaktadır. Literatürde bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

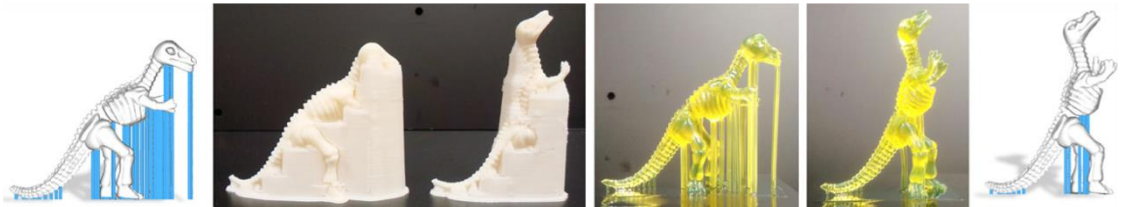
Calignano (2014) yaptığı çalışmada optimize edilmiş destek yapısı kullanarak sarkan yapıların üretilebilirliğini araştırmıştır. Taguchi L36 tasarımı kullanarak kendinden destekli optimum yapıları belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Leary ve ark. (2014) eklemeli imalat kuralları için tanımlanan tasarıma dayanarak, ek destek yapısı gerektirmeden üretilebilirliği sağlamak için topolojiyi değiştiren bir yöntem önermişlerdir. Benzer şekilde Li ve ark. (2017) gerçekleştirdikleri çalışmada hafif ve desteksiz tasarım yöntemi olarak adlandırılan bir tasarım yöntemi önermiştir. Hafif tasarım gerçekleştirmek için topoloji optimizasyonu uygulanmıştır ve desteksiz tasarım süreci geliştirilmiştir. Şekil 2.43'te gösterilen kiriş geliştirilen yöntem kullanılarak tasarlanmış ve destek yapısı gerektiren bölgelerde tasarım değiştirilerek destek yapısı gereksinimi olmadan SLM prosesi üretilebilmiştir.



**Şekil 2.43.** a) Üretilmesi için destek yapısı gereken orijinal tasarım ve b) destek yapısı olmadan üretilebilen tasarım (Li ve ark. 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Hu ve ark. (2015) destek yapılarının optimizasyonundan ziyade üretilmek istenen parçanın şeklini değiştirerek destek yapısı gereksinimini azaltmayı hedeflemiştir. Bu hedefe ulaşmak için destek yapısı gerektiren bölgeler Şekil 2.44'te görüldüğü gibi bölgesel olarak döndürülerek yerel optimizasyon problemi Gauss küresi üzerinde analiz edilmiştir.



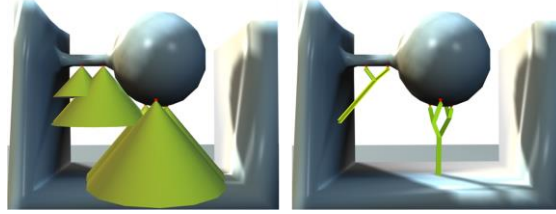
**Şekil 2.44.** Geometrinin değiştirilmesi ile destek yapısı miktarının azaltılması (Hu ve ark. 2015)

Mirzendehtel ve Suresh (2016) yapısal bileşenin topoloji optimizasyonu sırasında destek yapısı miktarını bir kısıt olarak kullanmışlardır. Topoloji optimizasyonu sırasında yapılan boşaltma işlemlerinde yüzeyin tabla ile yapacağı açı değerlendirilerek destek yapısı en aza indirilmiştir. Guo ve ark. (2017) bir yapısal bileşenin topoloji optimizasyonu sırasında destek yapısı gerektirmeyen geometrik unsurlar kullanarak kendi kendini destekleyen yapılar elde etmeyi hedeflemiştir. Sırasıyla Dönüşebilir Bileşenleri Taşıma (*Moving Morphable Components*, MMC) ve Dönüşebilir Boşlukları Taşıma (*Moving Morphable Voids*, MMV) çerçevelerine dayalı olarak kurulan iki çözüm yaklaşımı önerilmiş ve eklemeli imalat odaklı topoloji optimizasyonu ile ilgili bazı teorik konular da analiz edilmiştir. Bu boşluklara örnek olarak bir su damlası geometrisi verilebilir. Bu geometrik unsurun tablaya belirli bir açıda yerleştirilmesi sonucunda hiçbir bölgesi destek yapısı gerektirmemektedir. McConaha ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada destek yapılarına temizleme ekipmanlarının ulaşılabilirliğini değerlendirerek bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma Cezalandırılmalı Katı İzotropik Malzeme (*Solid Isotropic Material with Penalization*, SIMP) temelli topoloji optimizasyonuna dayanmaktadır. Ancak tasarlanan destek yapılarının üretilebilirlik açısından optimum olup olmadığı değerlendirilmemiştir. Giraldo-Londoño ve ark. (2020) eklemeli imalat destek yapılarını tasarlamak için Zhang-Paulino-Ramos (ZPR) güncelleme şeması temelli topoloji optimizasyonu kullanmışlardır. Çalışmada kompliyans ve sıcaklık farkı değerlendirilerek çok-amaçlı optimizasyon kullanılmıştır.

Kendi kendini destekleyen yapılar oluşturularak destek yapılarının kullanılması engellenebilir. Ancak bazı durumlarda tasarlanan parça olması gerektiğinden daha ağır olmaktadır. Özellikle havacılık sektörü göz önünde bulundurulduğunda ağırlık kazanımı atık malzemenin azaltılmasından ve buna bağlı oluşacak maliyetten daha önemli olabilir. Bu yöntem ilk defa tasarlanacak yapısal bileşenlerde kullanılabilir. Ancak tasarımının değiştirilmesi mümkün olmayan yapısal bileşenlerde destek yapılarının kullanılması bir gereklilik haline gelmektedir. Bu nedenle destek yapılarının oluşturulması ve optimizasyonu için birçok yöntem geliştirilmiştir.

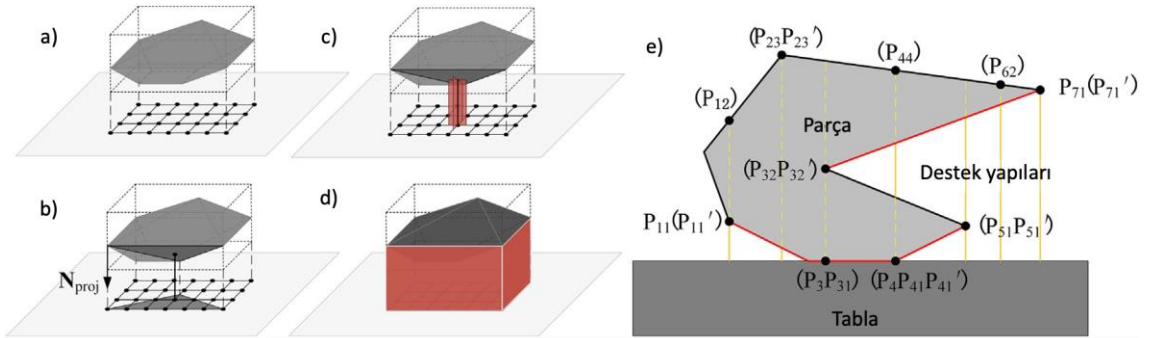
Qian ve ark. (2011) destek yapılarını oluşturmak için üçgenlerden oluşan parçayı analiz ederek özgün bir ayrık-işaretleme destek algoritması geliştirmiştir. Vanek ve ark. (2014) FDM prosesinde destek yapılarının azaltılması için bir optimizasyon çerçevesi

sunmuştur. Destek yapısında kullanılan malzemenin en aza indiren geometri tabanlı bir yaklaşım üzerinde çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın şematik gösterimi Şekil 2.45'te verilmiştir.



**Şekil 2.45.** Vanek ve ark. tarafından geliştirilen, konilere dayalı, destek yapısı oluşturma yöntemi (Vanek ve ark. 2014)

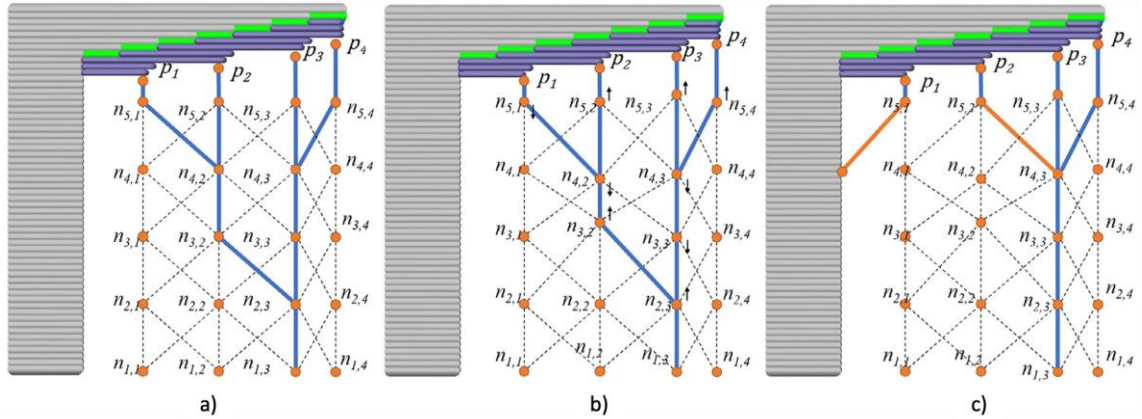
Zhang ve ark. (2018) destek yapılarını azaltmak için uygulanabilir bir yöntem sunmuştur. İlk olarak, tozların serilme yönüne göre farklı yüzey açılarında sınırları keşfetmek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Serici ile toz sermenin, eğimli yüzeylerin üretilmesi üzerine etkisi analiz edilmiştir. Ardından inceltilmiş destek yapılarının oluşturulması için farklı sarkma açılarını temel alan bir algoritma önerilmiştir (Şekil 2.46). Geliştirilen yöntem ile birkaç tipik uygulama üzerinde destek yapısı miktarını %35 oranında azaltarak yöntemin etkisi kanıtlanmıştır.



**Şekil 2.46.** Destek yapısı oluşturma süreci: a) desteklenecek noktaların dağılımının belirlenmesi, b) faset ve bir ışının kesişme noktasının belirlenmesi, c) tek bir destek yapısının oluşturulması, d) destek yapılarının oluşturulması ve e) özel noktalar ile işlemler (Zhang ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Vaissier ve ark. (2019) iç ve dış destek yapılarının geometrisini ve topolojisini optimize etmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Desteklenecek hacmi tek tip bir kafes yapısı ile doldurduktan sonra destek yapısı miktarını en aza indirmek için maksimum sayıdaki kirişi kaldırmışlardır. Kullanılan ilk kafes yapısı için en uygun geometri imalat teknolojisinin

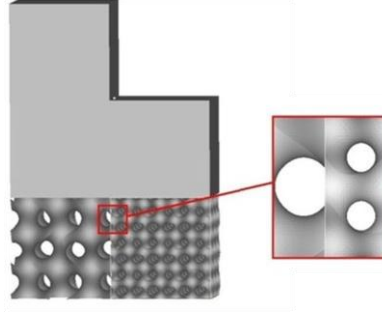
olanakları göz önünde bulundurularak başlangıçta tanımlanmıştır. Daha sonra yapının budanması, deney tasarımı ile kontrol parametrelerinin belirlendiği bir GA aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Zhang ve ark. (2020) destek yapısı hacmini, son işlem süresini ve maliyeti azaltmak için biyolojiden ilham alan bir destek yapısı tasarım yöntemi önermişlerdir. Çalışmada hafif, temizlenmesi kolay ve ısı transferini sağlayan destek yapıları tasarlamak için parametrik L sistemleri, evrimsel optimizasyon ve eklemeli imalat proses simülasyonunu birlikte kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ticari yazılımlar ile karşılaştırılmıştır. Feng ve ark. (2021) destek yapılarında kullanılan malzemeden tasarruf etmek için, eklemeli imalat yönergelerini göz önünde bulundurularak iki seviyeli bir destek yapısı oluşturma algoritması sunmuşlardır (Şekil 2.47). Tabla ile bağlantının sağlandığı birinci düzeyde kesik bir giriş yapısı ve ikinci düzeyde ağaç şeklinde bir yapıdan oluşan destek yapılarını önermişlerdir. Çalışma kapsamında doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir ve geliştirilen yöntemle %31.01'e kadar malzeme tasarrufu sağlanmıştır.



**Şekil 2.47.** a) Ağaç tipi destek yapısının iki boyutlu gösterimi, b) düğümlerin z-koordinatlarının PSO ile belirlenmesi ve c) daha az hacimli bir topolojiye sahip olan ağaç tipinde bir strateji (Feng ve ark. 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

Eklemeli imalat teknolojisinde hüresel yapılar da destek yapıları olarak kullanılmıştır. Strano ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada yapı oryantasyonu ve hüresel destek yapılarını optimize eden yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşım, kademeli destek yapıları da dahil olmak üzere hüresel destek yapılarının tasarımı ve üretimi için matematik temelli bir optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Üretilmek istenen nesnenin ağırlığının yoğunlaştığı yerlerde daha sağlam destek ve diğer yerlerde daha az destek yapısı sağlayan

kademeli hücresel yapılar kullanılmıştır (Şekil 2.48). Karmaşık geometriye sahip bir parça üzerinde sunulan yeni yaklaşımın önemli miktarda malzeme tasarrufu sağlayabileceği, böylece metal malzeme kullanılan imalat proseslerinin sürdürülebilirliğinin ve verimliliğinin artırılacağı düşünülmüştür.



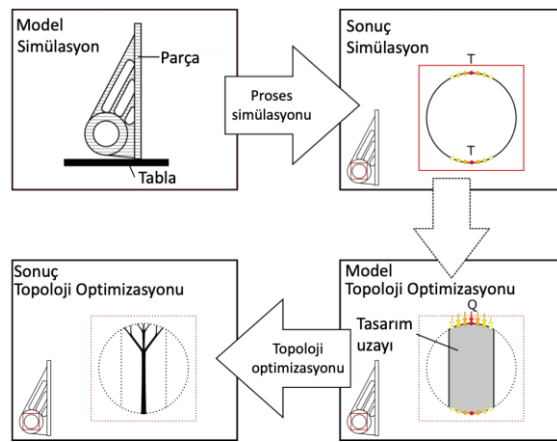
**Şekil 2.48.** Kademeli hücresel destek yapıları (Strano ve ark. 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

Vaidya ve Anand (2016) Dijkstra'nın en kısa yol algoritmasını kullanarak destek yapısı miktarını en aza indirmek için optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada hücresel destek yapıları kullanılmıştır ve parçanın imalatından sonra destek yapılarının temizlenmesi için kolaylık sağlamak amacıyla erişilebilirlik kısıdı da eklemiştir. Oluşturulan destek yapılarının parça ağırlığını destekleyip desteklemediğini test etmek için sonlu elemanlar analizleri ile doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisinde yazdırma yolunun planlanması da büyük önem arz etmektedir. Jiang ve ark. (2019) eklemeli imalat teknolojisinde destek yapıları için harcanan malzeme tüketimini azaltmak amacıyla baskı yolu planlaması yoluyla bir destek yapısı oluşturma yöntemi önermiştir. Yazdırma yolu, yazdırılabilir en uzun köprü mesafesi düşünüldüğünde destek kullanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışma sonucunda geliştirilen destek oluşturma yönteminin hem destek yapıları için harcanan malzeme tüketimini hem de son yüzey kalitesini etkilediği gösterilmiştir.

Yapısal bileşenleri çalışma koşulları altında verimli bir şekilde tasarlamak için topoloji optimizasyonu sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde topoloji optimizasyonu destek yapılarını optimize etmek için de kullanılmıştır.

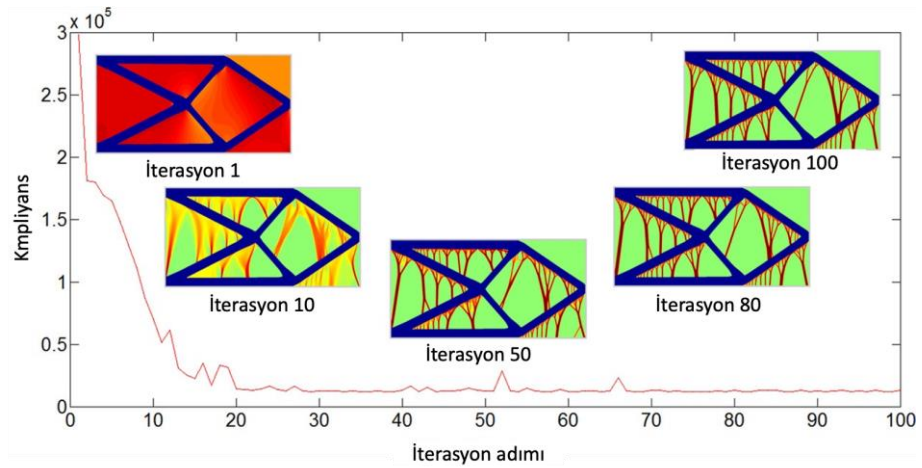
Allaire ve Bogosel (2018) destek yapılarını iki farklı fiziksel özelliği göz önünde bulundurarak optimize etmişlerdir. İlk olarak üretim sürecinde desteklenen yapının rijitliğini iyileştirmek için sarkan bölgeleri desteklemişlerdir. İkinci olarak ısı akışının iyileştirilmesi ve yapının eşit bir biçimde soğutulması konusunu değerlendirmişlerdir. Optimizasyon algoritmalarını seviye kümesi yöntemine ve Hadamard yöntemiyle şekil türevlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. İlk yaklaşımda, belirli ve sabit bir yapı için yalnızca desteklerin şekli ve topolojisi optimize edilmiştir. İkinci ve daha ayrıntılı stratejide, hem destek yapıları hem de yapı optimize edilmiştir. Bartsch ve ark. (2019) malzeme tüketimini azaltmak için destek yapılarını topoloji optimizasyonu yöntemi kullanarak oluşturmuşlardır. SLM proses simülasyonu ile bütünlük bir yöntem kullanarak destek yapılarının ilgili görevleri yerine getirmesinin yanı sıra minimum malzeme tüketimini sağlayacak şekilde uygulanabileceği vurgulanmıştır. Çalışmada termal yükler uygulanarak değerlendirilmiştir ve destek yapıları oluşturulmuştur. Geliştirilen yöntem Ti-6Al-4V malzemeden üretilmesi planlanan bir tasarım üzerinde uygulanmıştır. İlk olarak proses sonucunda oluşacak sıcaklık dağılımını tespit etmek için sonlu elemanlar analizi kurulmuştur. Gerçekleştirilen simülasyon sonucu girdi olarak kullanılarak, ikinci adımda, SIMP yöntemi kullanılarak, destek yapılarının topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen yöntemin iş-akış şeması Şekil 2.49'da verilmiştir. Ortaya çıkan sonuçta optimize edilmiş destek yapısı geometrisi ağaç dallarına benzer bir şekil sergilemiştir.



**Şekil 2.49.** Önerilen yöntemin iş-akış şeması (Bartsch ve ark. 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)



Liu ve ark. (2019) destek yapıları oluşturmak için topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır. Sarkma açısı bir kısıt olarak kullanılarak Süreklilik Topolojisi Optimizasyonu'na (*Continuum Topology Optimization*) dayalı bir algoritma önermişlerdir. Heaviside fonksiyon projeksiyonuna dayalı bir matematiksel model geliştirilerek SIMP yöntemi ile optimizasyon problemi çözülmüştür. Çalışmada yalnızca sarkma açısı ve kompliyans kısıt olarak kullanılmıştır. Çözüm adımları Şekil 2.50'de gösterilmiştir.

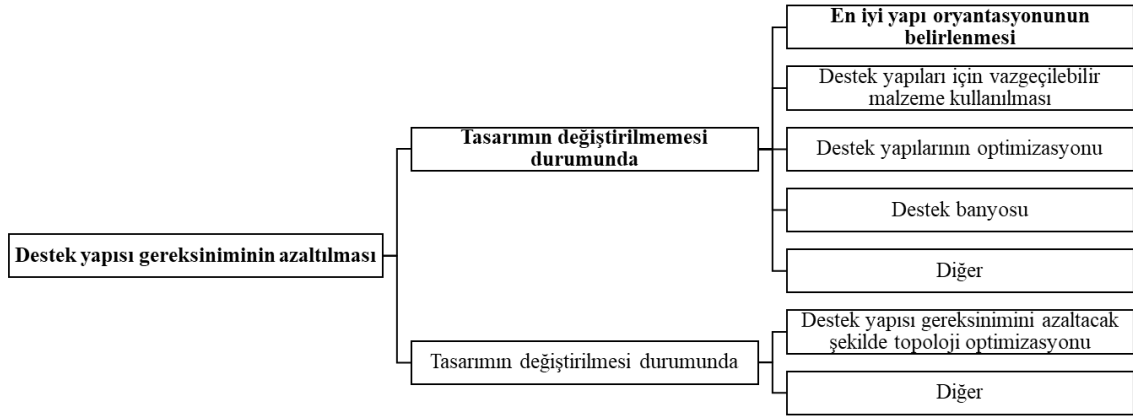


**Şekil 2.50.** Düzgün yük dağılımı ve sarkma açısı kısıtları doğrultusunda konsol giriş probleminin çözümü (Liu ve ark. 2019'den değiştirilerek alınmıştır)

Allaire ve ark. (2020) 2018 yılında gerçekleştirdikleri çalışmayı genişletmişlerdir. İlk olarak yansıtılmış alan ve sarkan yüzeyler için gereken desteklerin hacmi gibi basit kriterler değerlendirilerek yapı oryantasyonu optimize edilmiştir. Yapının bazı bölümlerinin desteklenmesini yasaklamak için veya kullanılabilir desteklerin kaldırılması için bir erişilebilirlik kriteri önerilmiştir. İkinci olarak, kompliyans minimizasyonu için destek yapılarının şekil ve topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları bu çalışmada da Hadamard metodunu kullanmışlardır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Eklemeli imalat proseslerinde destek yapılarının optimizasyonu kapsamında yapılan araştırmalar, büyük ölçüde üretim süresini kısaltmaya, destek yapılarında kullanılan malzemeleri değiştirmeye, destek yapısı tiplerine ve üretim öncesi işlemlerin optimizasyonuna odaklanmıştır. Bu hedeflere ulaşmak için gerçekleştirilen çalışmalarda çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır ve birçok yöntem kullanılmıştır. Yapılan çalışmaları basitleştirerek, çeşitlerin bir çerçeveye yerleştirilmesine yardımcı olmak için, Şekil 3.1'de gösterilen taksonomi tasarlanmıştır (Jiang vd., 2018). Bu tez kapsamında tasarımı yapılmış parçaların en az destek yapısı ile üretilmesi için yapı oryantasyonunun optimizasyonu üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.



**Şekil 3.1.** Destek yapılarının optimizasyon taksonomisi (Jiang ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

#### 3.1. Yazılımın Geliştirilmesi

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Python programlama dili kullanılmıştır. Python, nesne yönelimli, yorumlamalı, birimsel (modüler) ve etkileşimli yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Python programlama dilinde çeşitli işlevleri yerine getirmesi için geliştirilmiş birçok ücretsiz kütüphane bulunmaktadır. Ayrıca Python da ücretsiz olarak sunulmuştur ve birçok işletim sisteminde çalışabilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar için bu programlama dili seçilmiştir.

İlk olarak, detayları 2.6 numaralı başlıkta incelenen, STL dosya tipindeki veriler yazılıma aktarılmıştır. Bu veriler, amaçlarına uygun bölünerek, Python’da NumPy kütüphanesi kullanılarak değişkenlere atanmıştır (Şekil 3.2). NumPy, Python programlama dili için büyük, çok boyutlu dizileri ve matrisleri destekleyen, bu diziler üzerinde çalışacak üst düzey matematiksel işlevler ekleyen bir kütüphanedir. Bu kütüphanede bulunan matematiksel işlemler, amaç fonksiyonlarının hesaplanmasında da kullanılmıştır. Amaç fonksiyonlarının oluşturulması ve hesaplanması ile ilgili geliştirilen yöntemler tezin ilerleyen aşamasında detaylı olarak verilecektir.

Üçgenlerin koordinatları	Üçgenlerin normalleri
array([[ -23.33960724, 8. , -24.18921089], [ -23.33960724, 10. , -24.18921089], [ -0.60000002, 8. , -24.18921089]],	array([[ 0., 0., -1.], [ 0., 0., -1.], [ 0., 0., -1.],
[[ -0.60000002, 8. , -24.18921089], [ -23.33960724, 10. , -24.18921089], [ -0.60000002, 10. , -24.18921089]],	..., [ -0., 0., 1.], [ 0., 0., 1.], [ 0., 0., 1.]])
[[ -25.03666306, 8. , -24.18921089], [ -75. , 8. , -24.18921089], [ -25.03666306, 10. , -24.18921089]],	
...,	
[[ 50.41329575, 45. , -26.18921089], [ 50.41329575, 8. , -26.18921089], [ 72. , 45. , -26.18921089]],	
[[ 72. , 45. , -26.18921089], [ 50.41329575, 8. , -26.18921089], [ 75. , 8. , -26.18921089]],	
[[ 72. , 45. , -26.18921089], [ 75. , 8. , -26.18921089], [ 75. , 42. , -26.18921089]]])	

### Şekil 3.2. STL dosya formatında bulunan verilerin işlenmesi

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda en önemli işlevlerden biri STL dosyasında bulunan geometrinin istenen açılarda döndürülebilmesidir. Optimum yapı oryantasyonunun belirlenmesi için sürekli olarak döndürme işleminin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda ilk olarak döndürme matrisi kullanılmıştır. Lineer cebirde, bir döndürme matrisi, Öklid uzayında döndürme gerçekleştirmek için kullanılan bir dönüşüm matrisidir. Döndürme matrisi ile koordinatlar ve vektörler x, y ve z eksenleri etrafında üç boyutlu olarak döndürülebilmektedir. Denklem (3.1)’de üç temel döndürme matrisi verilmiştir. Denklem (3.2) kullanılarak STL dosyasında bulunan üçgen koordinatları ve yüzey normalleri istenen açılarda döndürülmüştür.

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

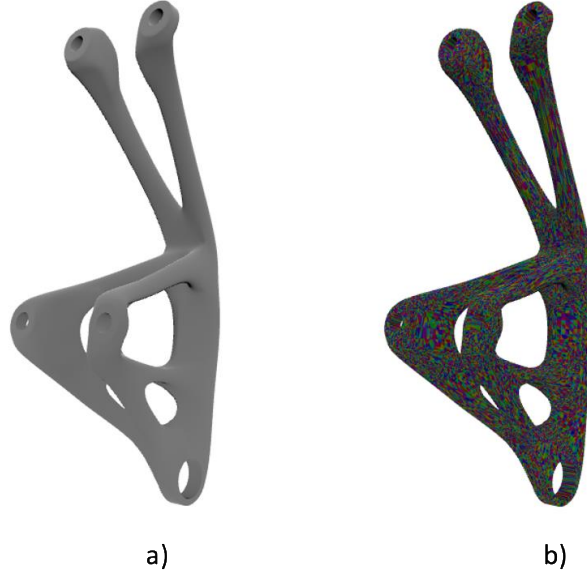
$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_z R_y R_x \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Yapı oryantasyonunun optimizasyonu sırasında döndürme işlemi sürekli tekrarlandığı için hesaplama yükünün büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle daha verimli döndürme yöntemi arayışına girilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda dördeylerin (*quaternions*) döndürme işleminde, birçok avantajı nedeniyle, kullanıldığı görülmüştür. Dördeyler, matematikçi Hamilton tarafından karmaşık sayıların işlevselliğini dört boyutlu bir sisteme genişletmek için tasarlanmıştır. Tez kapsamında döndürme işlemleri için Python kaynak kodları paylaşılan dördeyler de kullanılmıştır (Gohlke, 2021). Öteleme işlemi döndürmeye göre oldukça basittir. STL dosya tipinde bulunan üçgenlerin ötelenmek istenen eksendeki koordinatlarının öteleme miktarı kadar değiştirilmesi yeterlidir.

Geliştirilen yazılımda değişkenler yardımıyla bilgileri saklanan geometrinin görselleştirilmesi için Pyglet kütüphanesi kullanılmıştır. Pyglet, oyunların ve diğer multimedya uygulamalarının oluşturulması için nesne yönelimli bir uygulama programlama arayüzü sağlayan Python programlama dili için geliştirilmiş bir kütüphanedir. Şekil 3.3a'da geliştirilen yazılım ile bir STL dosyasının görselleştirilmesi örneği verilmiştir. Eklemeli imalat prosesinde sarkan ve güvenli yüzeylerin görselleştirilmesi öngörülerek Şekil 3.3b'de gösterildiği üzere her bir fasetin

renklendirilebilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekilde her bir faset için rasgele renk atanmıştır.



**Şekil 3.3.** STL dosya tipinin a) gösterimi ve b) her bir fasetin rastgele renk ile gösterimi. Elde edilen sonuçların görselleştirilmesi için Matplotlib kütüphanesi kullanılmıştır. Matplotlib, Python programlama dili ve sayısal matematik uzantısı NumPy için bir çizim kütüphanesidir. Bu kütüphane ile çizgi, sütun ve dilim gibi birçok grafik türü oluşturulabilmektedir. Ayrıca farklı bilimsel işlemler için SciPy ve pandas kütüphaneleri de kullanılmıştır.

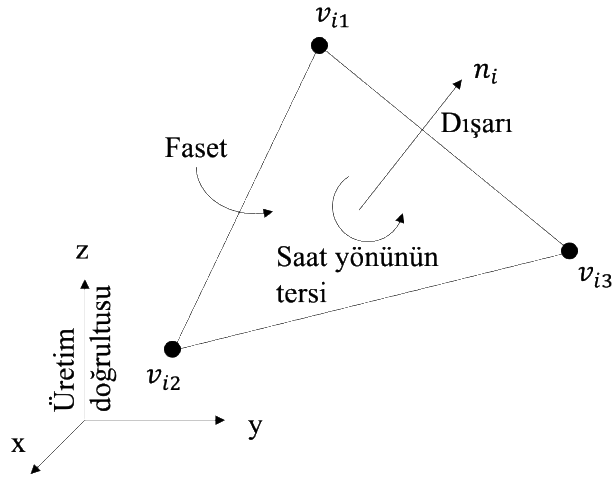
Sonuç olarak tez kapsamında STL dosya tipini okuyarak geometri üzerinde döndürme ve öteleme gibi birtakım işlemler gerçekleştirilebilen, geometrinin görselleştirilerek incelenebildiği ve elde edilen bazı sonuçları grafikler halinde kullanıcının değerlendirmesine sunan bir yazılım geliştirilmiştir.

### 3.2. Sarkan Unsurların Tespit Edilmesi

Eklemeli imalat prosesinde bazı unsurlar, genellikle üretimin yapılacağı tabla ile açılal ilişkilerinden ötürü, direkt olarak üretilemezler. Literatürde genellikle sarkan yüzeyler incelenmiştir. Ancak geometrinin temsilinde kullanılan, üçgenlere ait, kenarların ve noktaların da kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu bölümde sarkan yüzeyler, sarkan kenarlar ve sarkan noktaların tespit edilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar anlatılmıştır.

### 3.2.1. Sarkan yüzeylerin tespit edilmesi

Eklemeli imalat proseslerinde üretilebilir açı sınırını aşan yüzeylere sarkan yüzey denir. Parça yüzeyleri STL dosyasının barındırdığı, Şekil 3.4'te gösterilen, faset denilen küçük üçgenlerin toplamı olarak temsil edilmektedir. Sarkan yüzeylerin tespit edilmesi için STL dosyasında bulunan her bir faset ile üretimin yapılacağı tabla arasındaki açı incelenmelidir.



**Şekil 3.4.** Bir fasetin eklemeli imalat prosesinde kullanımının şematik gösterimi

Her faset, bir birim normal vektör ve sağ el kuralı çerçevesinde sıralanan üç köşenin koordinatları ile tanımlanır ve düzlemseldir. Bu tanımdan yola çıkarak bir parça üzerindeki sarkan yüzeyleri tespit edebilmek için STL verisinde bulunan her üçgen yüzeyin normali ile üretim yönünü temsil eden vektör arasındaki açı incelenmiştir. Tek bir noktadan başlayan iki vektör arasındaki açı, vektörlerden birini diğer vektör ile eş yönlü konuma döndürmek zorunda olunan en kısa açı olarak tanımlanır. Bu iki vektör arasındaki açının kosinüsü, bu vektörlerin nokta çarpımının vektör büyüklüğünün çarpımına bölünmesine eşittir. Böylece  $i$ 'inci faset ile tabla arasındaki açı ( $\theta_i$ ) Denklem (3.3) ile hesaplanmıştır.

$$\theta_i = \cos^{-1} \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_b}{|\vec{n}_i| |\vec{n}_b|} \quad (3.3)$$

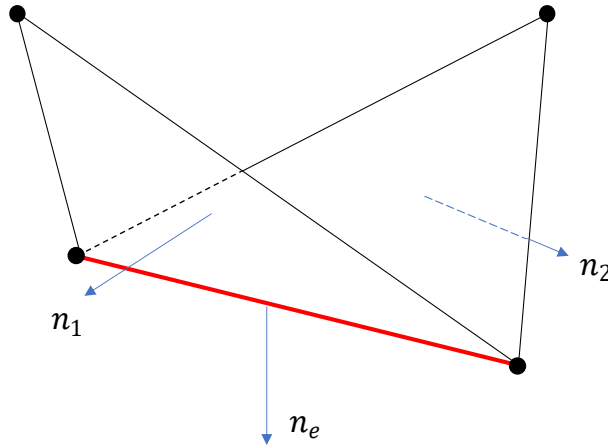
$\vec{n}_i$   $i$ 'inci yüzeyin normali,  $\vec{n}_b = (0, 0, -1)$  ise üretim yönünün tersini temsil eden vektördür.

Hesaplanan bu açı değerinin prosese bağımlı olarak değişen bir eşik açının altında kalması durumunda ( $\theta_i < OA$ ) sarkan yüzey olarak belirlenir. SLM prosesi için bu eşik açı değeri,  $OA = 45^\circ$  olarak kabul edilmektedir.

STL dosyası her bir faset için  $\vec{n}_i$  değerini içerisinde barındırmaktadır. Ancak bu yüzey normali sağ el kuralı çerçevesinde fasetin bilinen üç koordinatı ile de hesaplanabilir. Bazen STL dosyaları hasar görebilmektedir. Bu gibi durumlarda STL dosyasında bulunan yüzey normalleri ile koordinatlar ile hesaplanan yüzey normalleri karşılaştırılabilir ve hasarlı fasetler tespit edilebilir. Bu çalışmada, öncelikle her bir faset için STL dosyasında bulunan yüzey normalleri ile hesaplanan yüzey normalleri karşılaştırılmıştır. Eşleşme olmadığı durumlarda koordinatlardan hesaplanan yüzey normalleri ile işlem gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2. Sarkan kenarların tespit edilmesi

Üretilmek istenen parçanın geometrisine ve yapı oryantasyonuna bağlı olarak bir kenara bağlanan komşu iki faset sarkan yüzey olmayabilir. Ancak Şekil 3.5'te görülebileceği üzere sarkan yüzey olmayan komşu iki faseti birleştiren kenarın üretilebilmesi mümkün olmayabilir. Bu kenarlara sarkan kenar denir ve üretilebilmesi için destek yapıları gerekmektedir.



Şekil 3.5. Sarkan kenarın şematik gösterimi

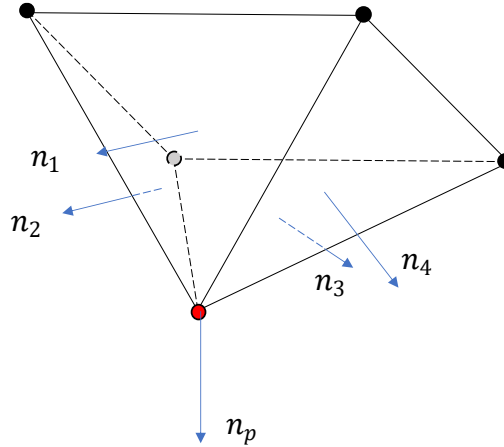
Sarkan bir kenarın normaline bağlı olduğu iki yüzeyin normalleri ile Denklem (3.4) ile hesaplanmıştır.

$$\vec{n}_e = \frac{\vec{n}_1 + \vec{n}_2}{2} \quad (3.4)$$

Burada  $\vec{n}_1$  ve  $\vec{n}_2$  kenara ait olan iki fasetin yüzey normallerini temsil etmektedir. Kenarın normali hesaplandıktan sonra Denklem (3.3) ile sarkan olma durumu kontrol edilmiştir. Sarkan yüzey kontrolüne benzer olarak eşik açının altında kalması durumu ( $\theta_e < OA$ ) kontrol edilmiştir.

### 3.2.3. Sarkan noktaların tespit edilmesi

Üretilmek istenen parçanın geometrisine ve yapı oryantasyonuna bağlı olarak bir noktayı paylaşan ikiden fazla faset sarkan yüzey olmayabilir. Ancak Şekil 3.6’da görüldüğü gibi sarkan yüzey olmayan ikiden fazla faseti birleştiren noktanın üretilebilmesi mümkün olmayabilir. Bu noktalara sarkan nokta denir ve üretilebilmesi için destek yapıları gerekmektedir.



**Şekil 3.6.** Sarkan noktanın şematik gösterimi

Sarkan bir noktanın normaline bağlı olduğu yüzeylerin normalleri ile Denklem (3.5) ile hesaplanmıştır.



$$\vec{n}_p = \frac{\sum_{j=1}^{FC} \vec{n}_j}{FC} \quad (3.5)$$

Burada  $n_j$  noktayı paylaşan fasetlerin yüzey normallerini ve  $FC$  ise noktayı paylaşan fasetlerin sayısını temsil etmektedir. Noktanın normali hesaplandıktan sonra Denklem (3.3) ile sarkan olma durumu kontrol edilmiştir. Sarkan yüzey kontrolüne benzer olarak eşik açının altında kalması durumu ( $\theta_p < OA$ ) kontrol edilmiştir.

### 3.3. Destek Yapısı Miktarının Tahmin Edilmesi

Eklemeli imalat proseslerinde üretilecek parçanın yapı oryantasyonuna bağlı olarak bazı yüzeyleri üretilebilir açı sınırını aşabilir. Bu sarkan yüzeylerin başarılı bir biçimde üretilebilmesi için destek yapıları gereklidir. Literatürde destek yapısı miktarının belirlenmesi için STL veri tipi, birçok farklı yöntem kullanılarak incelenmiştir. En çok kullanılan üç yöntem aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1- Destek yapısı gereksinimi olan yüzeylerin alanlarının belirlenmesi ve toplanması (Matos vd., 2020, 2021; Pereira vd., 2018; Phatak & Pande, 2012; Rocha vd., 2018)
- 2- Destek yapısı gereksinimi olan yüzeylerin tablaya yansıtılmış alanlarının belirlenmesi ve toplanması (Ga vd., 2018; A. Li vd., 2010)
- 3- Destek yapısı gereksinimi olan yüzeyler ile tabla arasında kalan hacmin belirlenmesi ve toplanması (Golmohammadi & Khodaygan, 2019; Sahu & Andhare, 2019)

Bu bölümde, destek yapısı miktarının hesaplanması için gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki yöntemlerin yanı sıra daha doğru sonuçlar elde edebilmek için bir yöntem geliştirilmiştir. Tüm yöntemlerin karşılaştırılabilmesi ve farklılıklarının incelenebilmesi için bazı geometrik unsurlar içeren bir numune tasarlanmıştır. Tasarlanan numune üzerinde literatürde kullanılan yöntemler ve geliştirilen yöntem ile destek yapısı miktarları ve oluşan yüzde hatalar belirlenerek 4. bölümde incelenmiştir.

### 3.3.1. Yüzey alanı yöntemi

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda destek yapısı miktarını temsil etmek için sarkan yüzeylerin alanlarının toplam değeri kullanılmıştır. Üç koordinatı bilinen bir üçgenin alanı direkt olarak çarpımının yarısı ile Denklem (3.6) kullanılarak hesaplanabilir.

$$A_i = \frac{1}{2} \sqrt{\begin{aligned} & \left( (v_{i2x}v_{i1y}) - (v_{i3x}v_{i1y}) - (v_{i1x}v_{i2y}) \right)^2 \\ & + \left( (v_{i3x}v_{i2y}) + (v_{i1x}v_{i3y}) - (v_{i2x}v_{i3y}) \right)^2 \\ & + \left( (v_{i2x}v_{i1z}) - (v_{i3x}v_{i1z}) - (v_{i1x}v_{i2z}) \right)^2 \\ & + \left( (v_{i3x}v_{i2z}) + (v_{i1x}v_{i3z}) - (v_{i2x}v_{i3z}) \right)^2 \\ & + \left( (v_{i2y}v_{i1z}) - (v_{i3y}v_{i1z}) - (v_{i1y}v_{i2z}) \right)^2 \\ & + \left( (v_{i3y}v_{i2z}) + (v_{i1y}v_{i3z}) - (v_{i2y}v_{i3z}) \right)^2 \end{aligned}} \quad (3.6)$$

Burada  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$ ,  $i$ 'inci fasetin koordinatlarını temsil etmektedir.  $v_{i1} = (v_{i1x}, v_{i1y}, v_{i1z})$  ise üçgen yüzeyin birinci koordinatının x, y ve z bileşenlerini temsil etmektedir. Diğer terimler bu açıklamaya göre Şekil 3.4'den türetilir.

Sarkan fasetlerin alanlarının toplamı ( $A_s$ ) Denklem (3.7) ile hesaplanmıştır.

$$A_s = \sum_{i=1}^N KA_i \quad (3.7)$$

$\theta_i < OA$  olduğu durumda  $K = 1$ , diğer durumlarda ise  $K = 0$  olarak kabul edilmiştir. Böylece tüm fasetler içinde sarkan fasetlerin toplam alanı matematiksel olarak ifade edilmiştir.  $N$ , STL dosyasının içerisinde barındırdığı fasetlerin sayısını temsil etmektedir.

### 3.3.2. Yansıtılmış yüzey alanı yöntemi

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda destek yapısı miktarını temsil etmek için sarkan yüzeylerin üretimin yapılacağı tablaya yansıtılan alanlarının toplam değeri kullanılmıştır. Sarkan fasetlerin yansıtılmış alanlarının toplamı ( $A_{ps}$ ) Denklem (3.8) ile hesaplanmıştır.

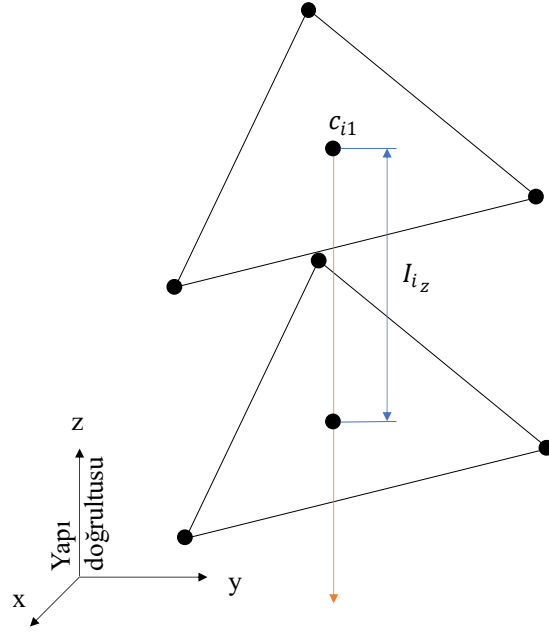
$$A_{ps} = \sum_{i=1}^N KA_i \cos \theta_i \quad (3.8)$$

### 3.3.3. Hacim yöntemi

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda destek yapısı miktarını temsil etmek için sarkan yüzeyler ile üretimin yapılacağı tabla arasında kalan hacimlerin toplam değeri kullanılmıştır. Hacim hesaplanırken tablaya yansıtılmış alan ile fasetin yapı doğrultusundaki ortalama yükseklik değerleri kullanılmıştır. Sarkan fasetler ile tabla arasında kalan hacim ( $V_{st}$ ) Denklem (3.9) ile hesaplanmıştır.

$$V_{st} = \sum_{i=1}^N KA_i \cos \theta_i (v_{i1_z} + v_{i2_z} + v_{i3_z}) \frac{1}{3} \quad (3.9)$$

Bu çalışmada, destek yapılarının miktarını belirlemek için, Denklem (3.9) kullanılarak elde edilen üçüncü yöntem ek olarak, faset ve tabla arasında üretilmek istenen parça geometrisinin bulunması durumu kontrol edilmiştir. Bu kontrolü sağlamak için Şekil 3.7'deki gibi sarkan yüzeyin orta noktasından yapı doğrultusunun tersine bir ışın gönderilmiştir. Kesişme durumu kontrol edilirken Möller-Trumbore ışın-üçgen kesişim algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın bir avantajı, düzlem denkleminin anında hesaplanmasına veya depolanmasına gerek olmamasıdır. Bu da üçgen ağlar için önemli ölçüde bellek tasarrufu sağlamaktadır. Möller ve Trumbore geliştirdikleri yöntemin hız açısından önceki ışın-üçgen kesişim yöntemlerinden daha iyi olduğunu vurgulamışlardır (Möller & Trumbore, 2005). Işının çarptığı ilk faset üzerindeki kesişme noktası belirlenerek, iki faset arasındaki uzaklık ( $I_{i_z}$ ) hesaplanmıştır.



**Şekil 3.7.** Sarkan yüzeyden oluşturulması planlanan destek yapısının kendi geometrisi ile kesişmesi durumu

Tez kapsamında kesişme olması ihtimali göz önünde bulundurulmuştur ve destek yapısı hacmi ( $V_s$ ), faset ile kesişme noktası arasında kalan mesafenin dikkate alındığı Denklem (3.10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_s = \sum_{i=1}^N KA_i \cos \theta_i \left( (v_{i1_z} + v_{i2_z} + v_{i3_z}) \frac{1}{3} - I_{i_z} \right) \quad (3.10)$$

$I_{i_z}$ , üçgen yüzeyin orta noktasından üretim yönünün tersinde gönderilen ışının kendi geometrisi ile ilk kesiştiği noktanın z doğrultusundaki değerini temsil etmektedir. Kesişme olmaması durumunda  $I_{i_z} = 0$  kabul edilmektedir.

### 3.4. Üretim Süresinin Tahmin Edilmesi

PBF-L prosesleri yüksek ilk yatırım maliyetine sahiptir. Ayrıca kaliteli toz malzemelerin kullanılması, yüksek bilgi birikimine sahip personel gereksinimi ve üretim sonrası işlem gereksinimi nedeniyle yüksek üretim maliyetine de sahiptir. Bu nedenle üretim maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri olan üretim süresinin azaltılması oldukça önemlidir. Üretim süresi PBF-L prosesleri için temel olarak destek yapısı miktarına, parçanın üretim

doğrultusundaki boyuna, katman kalınlığına, yeni katmanın serilme süresine, lazerin tarama hızına, lazerin çapına ve tarama aralığına bağlıdır. Üretim süresini etkileyen bu faktörlerden destek yapısı miktarı ve parçanın üretim doğrultusundaki boyu yapı oryantasyonundan etkilenmektedir. Bu nedenle üretim süresi yapı oryantasyonu ile direkt olarak alakalıdır.

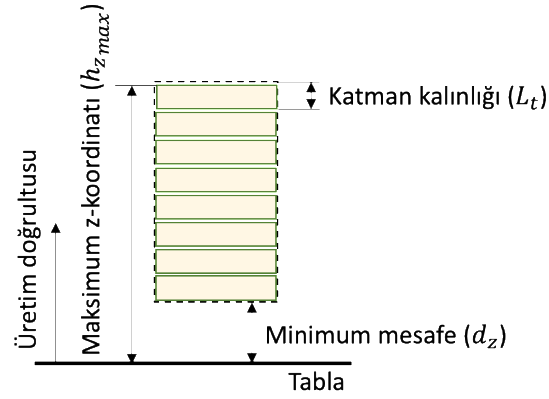
PBF-L prosesindeki gerçekçi üretim süresi, prosesin çalışma prensibi düşünüldüğünde, lazerin tüm katmanlarda takip ettiği toplam mesafe için geçen süre ve toz malzemeyi yeniden sermek için harcanan sürenin toplanmasıyla elde edilebilir. Dış yüzeyin kalitesini daha iyi hale getirmek için her katmanın yüzeyini temsil eden dış konturunda normalden farklı lazer tarama hızı kullanılabilir. Bu nedenle toplam tarama mesafesi, parçanın iç bölgelerinde izlenen yolun toplamı ve tüm katmanların yüzey konturlarının toplamı olarak iki başlık altında incelenebilir. Yukarıda anlatılan adımlar takip edilerek üretim süresi ( $t_{realistic-build}$ ), Denklem (3.11) ile hesaplanabilir.

$$t_{realistic-build} = \frac{\sum_{i=1}^{L_c} X_{inner_i}}{v_{inner}N_L} + \frac{\sum_{i=1}^{L_c} X_{contour_i}}{v_{contour}N_L} + L_c t_{recoat} \quad (3.11)$$

$X_{inner_i}$ , parçanın ve destek yapılarının  $i$ 'inci katmanındaki kesit alanında taranacak toplam mesafeyi temsil etmektedir. Bu mesafe kullanılan tarama stratejisine ve tarama aralığına bağlı olarak değişiklik gösterecektir.  $X_{contour_i}$  ise parçanın  $i$ 'inci katmanındaki yüzey konturunun mesafesini ifade etmektedir.  $v_{inner}$ ,  $v_{contour}$ ,  $L_c$  ve  $t_{recoat}$  sırasıyla katmanın iç bölgesindeki lazer hızını, yüzey konturlarını taramak için belirlenen lazer tarama hızını, katman sayısını ve yeniden serme süresini temsil etmektedir. Ayrıca teknolojinin ilerlemesi ile üç boyutlu yazıcılarda kullanılan lazer sayısı artırılmıştır. Burada  $N_L$  lazer sayısı temsil etmektedir. Katman sayısı ( $L_c$ ), Denklem (3.12) ile hesaplanmıştır.

$$L_c = \frac{h_{zmax} - d_z}{L_t} \quad (3.12)$$

$L_t$ ,  $h_{z_{max}}$  ve  $d_z$  sırasıyla katman kalınlığını, parçanın üretim doğrultusundaki en büyük koordinatını ve tabla ile parça arasında yapı doğrultusunda bırakılan en az mesafeyi temsil etmektedir (Şekil 3.8).



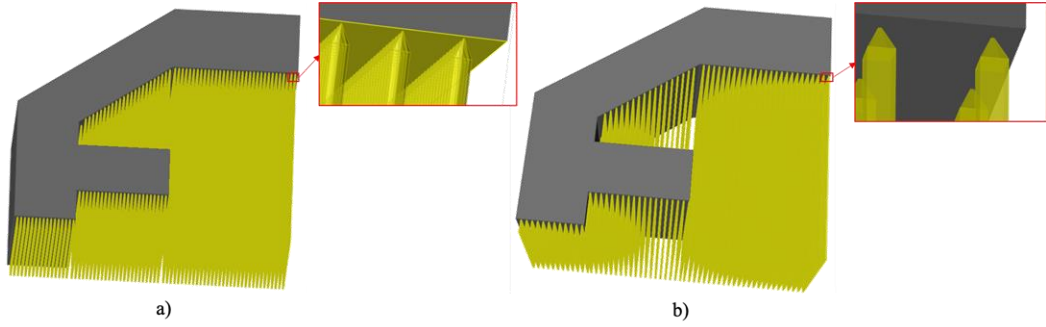
**Şekil 3.8.** Eklemeli imalat prosesinde kullanılan bazı terimlerin gösterimi

Yapı oryantasyonunun optimizasyonu sırasında, parça farklı açılarda döndürülerek, üretim süresinin hesaplanması gerekmektedir. Üretim süresinin Denklem (3.11) ile elde edilmesi için her bir döndürme işleminde tarama hesaplama algoritması çalıştırılmalı ve mesafeler hesaplanmalıdır. Bu nedenle yüksek hesaplama maliyeti oluşmaktadır. Daha hızlı işlem yapabilmek için bu denklemi yaklaşık olarak temsil eden özgün bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model Denklem (3.13)'de verilmiştir ve bu tez kapsamında, üretim süresinin hesaplaması için bu tahmin modeli kullanılmıştır.

$$t_{build} = \frac{(V_p + V_s r_{vf})}{v_{inner} L_t X_h N_L} + \frac{A_p}{v_{contour} L_t N_L} + L_c t_{recoat} \quad (3.13)$$

$V_p$ ,  $A_p$ ,  $X_h$  ve  $r_{vf}$  sırasıyla parçanın hacmini, parçanın dış yüzeyinin toplam alanını, tarama mesafesini ve destek yapılarının hacim oranını temsil etmektedir. Şekil 3.9a ve Şekil 3.9b'de görünen destek yapıları, sırasıyla 3 mm aralığa sahip iğne (*pin*) destek yapısı tipi ve 4 mm aralığa sahip kare destek yapısı tipi ile, *Altair Inspire 2020* yazılımında üretilmiştir. Destek yapısı tipinin hacim oranı ( $r_{vf}$ ), basit bir geometri üzerinde oluşturulan destek yapısı hacmini, destek yapısı gerektiren hacme bölerek

kolayca hesaplanabilir. Bu çalışmada iğne ve kare destek yapısı tipi için hacim oranı 0,0730 ve 0,0597 olarak elde edilmiştir.



**Şekil 3.9.** Oluşturulan destek yapısı tipleri a) 3 mm aralıkla oluşturulan iğne destek yapısı tipi ve b) 4 mm aralıkla oluşturulan kare destek yapısı tipi

Parçanın dış yüzey alanının toplamı olan  $A_p$ 'yi elde etmek için Denklem (3.7) ile tüm fasetlerde  $K = 1$  kabul edilerek hesaplanmıştır. Üretilmek istenen parçanın hacmi,  $V_p$  ise STL dosyasında bulunan veriler kullanılarak yüzey integrali yöntemi ile hesaplanmıştır. Eksik fasetlerin bulunması durumunda bu yöntem çalışmamaktadır. Yani hacim hesabının STL dosyası ile yapılabilmesi için tamamen kapalı ve bir hacmi temsil eden yüzey yapısına ihtiyaç vardır.

### 3.5. Parça Yerleşiminin Çok-amaçlı Optimizasyonu

Son yıllarda, SLM prosesi havacılık, medikal ve otomotiv sektörlerinde çok sayıda potansiyel uygulama ile son kullanım parçaları için geçerli bir üretim aracı olarak kabul edilmiştir. Halihazırda yüksek üretim maliyeti ve sürelerine sahip metalik eklemeli imalat teknolojisindeki ana zorluklardan biri, üretim süresini ve maliyetini azaltarak prosesin sürdürülebilirliğini iyileştirmektir. Ancak bu hedefe ulaşmak için parça kalitesi ve üretim maliyetiyle ilişkili karmaşık süreçlerin çözülmesi gerekmektedir. Yapı oryantasyonu yüzey kalitesi, geometrik doğruluk, destek yapısı miktarı, üretim süresi ve üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Birçok mühendislik uygulamasında birden fazla amacı olan optimizasyon problemleri bulunmaktadır. Çok-amaçlı optimizasyon, birden fazla amacı aynı anda optimize etmek için kullanılır. Çelişkili hedeflerin optimizasyonunda tek-amaçlı optimizasyon algoritmaları ile tüm amaçların en iyi çözüm değerine ulaşması mümkün değildir.

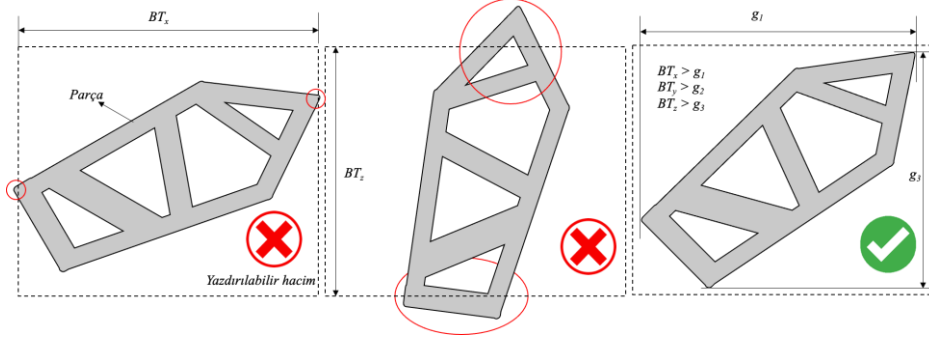
Çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesiyle elde edilen Pareto cephe çözüm kümesinde bulunan farklı alternatifler, kullanıcıya geniş seçenek yelpazesi sunmaktadır (Fountas & Vaxevanidis, 2021a, 2021b). Bu çalışmada çok-amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde etkili yöntemlerden biri olan NSGA-II kullanılmıştır (A.-D. Li vd., 2016). NSGA-II, her bir amacı, birbirini baskılamayacak şekilde, eş-zamanlı olarak optimize etmektedir (Deb vd., 2002; Salmasnia vd., 2018).

Bu çalışma, tüm amaç fonksiyonları açısından mümkün olduğu kadar iyi ve herhangi bir ihlal içermeyen bir dizi çözüm bulmayı amaçlamaktadır. Problem tanımı Denklem (3.14)'deki gibi yapılmıştır.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && f_1(\varphi) = V_s r_{vf} \\
 &\text{Minimize} && f_2(\varphi) = t_{build} \\
 &\text{s.t.} && g_1(\varphi) < BT_x \\
 & && g_2(\varphi) < BT_y \\
 & && g_3(\varphi) < BT_z
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

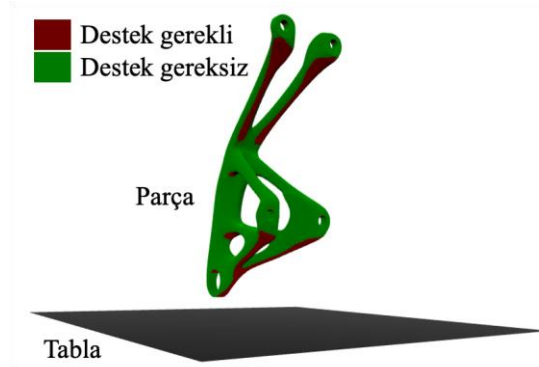
$f_1$  ve  $f_2$  sırasıyla birinci ve ikinci amaç fonksiyonu olan destek yapısı hacmini ve üretim süresini temsil etmektedir. Problem değişkenleri  $\varphi = (\{\theta_x, \theta_y\})$  olarak tanımlanmıştır. Burada  $\theta_x$  ve  $\theta_y$ , x ve y eksenindeki dönme açılarını temsil etmektedir ve  $0^\circ \leq \theta_x \leq 360^\circ$  ve  $0^\circ \leq \theta_y \leq 360^\circ$  olarak sınırlandırılmıştır. z eksenindeki dönmeden yüzeylerin açıları ve üretim doğrultusundaki parça yüksekliği etkilenmemektedir. Bu nedenle değişken olarak tanımlanmamıştır.  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  ve  $BT_x$ ,  $BT_y$ ,  $BT_z$  parçanın yapı oryantasyonu sonucunda her ekseninde oluşan maksimum ölçülerini ve üretim yapılacak cihazın tüm eksenlerdeki üretim sınırlarını temsil etmektedir. Şekil 3.10'da bulunan ilk ve ikinci örnekte görülebileceği üzere, belirlenen optimum yapı oryantasyonu her zaman üretilebilir olmayabilir. Literatürde gerçekleştirilen yapı optimizasyonu çalışmalarında yazıcının limitleri kısıt olarak eklenmemiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar her zaman üretilebilir olmayabilir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çok-amaçlı optimizasyon çalışmasında, yazıcı boyutları kısıt olarak eklenerek, her zaman üretilebilir yapı oryantasyonlarının elde edilmesi garanti edilmiştir.





**Şekil 3.10.** Yapı oryantasyonu sonucunda oluşan maksimum ölçüler ve yazıcı sınırları ile etkileşimi

Çok-amaçlı optimizasyon problemi, geleneksel üretim teknolojileri kullanılarak üretmek için önemli ölçüde zaman ve kaynak gerektiren bir parça için çözülmüştür. Bu parça Altair Inspire 2020 yazılımında eğitim parçası olarak kullanılan bir havacılık braketidir (Şekil 3.11). Literatürde çalışmaların değerlendirilebileceği standart bir numune bulunmadığından diğer araştırmacıların geliştirdiği yöntemler ile karşılaştırma çalışmaları gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle tez kapsamında tüm araştırmacıların kolayca erişebileceği bir parça seçilmesine özen gösterilmiştir. Parça ile ilgili detaylı bilgiye Çizelge 3.1'den ulaşılabilir. Parçayı x ve y ekseninde  $\theta_x$  ve  $\theta_y$  açılarında döndürmek için dördeyler kullanılmıştır. Her döndürmede adil bir değerlendirme gerçekleştirebilmek için döndürme sonrasında parça, tabla ile arasında belirlenen minimum mesafeyi sabit tutacak şekilde ötelenmiştir. Parçaya uygulanan tüm döndürme ve öteleme işlemleri sanal bir kopya üzerinde gerçekleştirilmiştir. Böylece NSGA-II ile oluşturulan yeni değişkenler bir önceki denemede gerçekleştirilen döndürme ve öteleme işlemlerinden etkilenmemiştir.



**Şekil 3.11.** Bir havacılık braketinin geliştirilen yöntem ile görsel değerlendirilmesi

**Çizelge 3.1.** Havacılık braketinin bazı özellikleri

Parametre	Sembol	Değer
Faset sayısı	$N$	98 588
Hacim	$V_p$	5 293,40 mm <sup>3</sup>
Yüzey alanı	$A_p$	4 828,75 mm <sup>2</sup>
Kapsayıcı kutu ölçüleri	-	49,04 x 24,44 x 75,47 mm <sup>3</sup>

SLM prosesi ile alakalı proses parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu parametreler genel olarak PBF-L yazıcı ve bu yazıcılar için malzeme üreten firmaların kataloglarından jenerik olarak seçilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Optimizasyon ve tahmin modellerinde kullanılan bazı parametreler ve değerleri

Parametre	Sembol	Değer
Sarkma açısı	$OA$	45°
Tabla ile mesafe	$d_z$	5 mm
Katman kalınlığı	$L_t$	0,03 mm
Tarama mesafesi	$X_h$	0,07 mm
Tarama hızı	$v_{inner}, v_{contour}$	1 250 mm/s
Hacim oranı	$r_{vf}$	0,0730
Lazer sayısı	$N_L$	1
Yeniden toz serme süresi	$t_{recoat}$	20 s
Yazıcı ölçüleri	$BT_x, BT_y, BT_z$	240 x 240 x 280 mm <sup>3</sup>

Bu çalışmada 200 bireylik bir popülasyon büyüklüğü seçilmiş ve aynı sayıda yavru üretmek yerine her yeni adımda 10 tane fazladan yavru oluşturulmasına karar verilmiştir. Böylece daha açgözlü bir varyant elde edilmiştir ve yerel Pareto cephelerinin varlığı gibi optimizasyonla ilgili zorluklar olmadan problemin yakınsaması iyileştirilmiştir. Ayrıca, çiftleşmeden üretilen yavruların tasarım alanı değerleri açısından kendilerinden ve mevcut popülasyondan farklı olmasını sağlamak için tekrar eden yavrular ortadan kaldırılmıştır. Maksimum nesil sayısı 200 olarak belirlenmiştir.

### 3.6. Karar-verme Mekanizmasının Geliştirilmesi

Çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesi sonucunda alternatif yapı oryantasyonlarını içeren bir çözüm kümesi elde edilmektedir. Ancak uygulamak için tek bir sonucun seçilmesi gerekmektedir. Bu seçimi yapmak için ilk olarak Pareto cephesinde bulunan çözümler her iki amaç fonksiyonu için de skaler hale getirilmiştir. Daha sonra her iki amaç fonksiyonu da Denklem (2.3)'deki gibi o amaç fonksiyonunun önemini gösteren bir ağırlık değeriyle çarpılarak toplanmıştır. Böylece çok-amaçlı olarak tanımlanan problem  $f = f_1w_1 + f_2w_2$  olmak üzere bir tek-amaçlı optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Normalleştirilmiş verilerden bir karar vermek için uzlaşmalı programlama (*compromise programming*) ve ağırlıklı toplam (*weighted sum*) yöntemi kullanılmıştır.

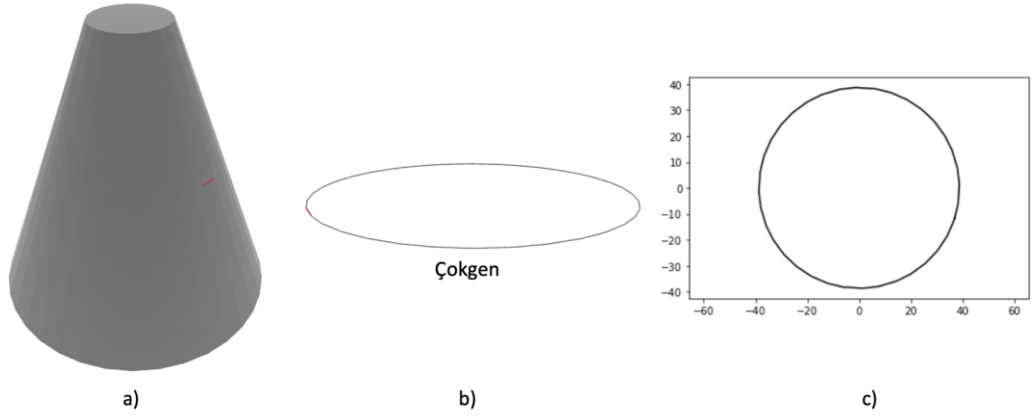
### 3.7. Yapı Oryantasyonunun Geometrik Doğruluğa Etkisinin İncelenmesi

Özellikle SLM gibi yüksek ısı girdisi olan metalik eklemeli imalat proseslerinde yapı oryantasyonunun parçanın geometrik doğruluğu üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu ilişki temel olarak yapı oryantasyonu sonucunda oluşan kesit alanı dağılımından kaynaklanmaktadır. Bu tez kapsamında ortalama kesit alanı ve dilimleme sonrasında oluşan kesit alanı dağılımının parçanın geometrik doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Proses simülasyonları *Altair Inspire 2020* yazılımı kullanılarak Çizelge 3.3'teki parametreler ile gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Proses simülasyonu gerçekleştirilen parametreler

Parametre	Değer
Hız	1,3 m/s
Lazer gücü	370 W
Katman kalınlığı	$3,0 \times 10^{-5}$ m
Toz emilimi (Powder Absorption)	10,0 %
Soğuma süresi	150 s
Tabla sıcaklığı	303,15 K

Kullanılan ticari yazılımda ortalama kesit alanını ve bu alanların dağılımını hızlı şekilde elde etmek için herhangi bir modül bulunmamaktadır. Bu nedenle tez kapsamında geliştirilen yazılımda STL dosya tipinden alınan geometriyi dilimlemek için bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile Şekil 3.12a'daki konik parçanın z doğrultusundaki orta noktasından Şekil 3.12b'deki üç boyutlu kesit alınmıştır. Ayrıca bu kesit Şekil 3.12c'de görüldüğü üzere iki boyutlu olarak incelenebilmektedir. Geliştirilen yöntem ile istenen düzlemde istenen aralıklar ile kesit alanları belirlenebilmektedir. Ayrıca gerçekleştirilmesi planlanan geometrik doğruluk araştırması için bu işlem üretim doğrultusunda otomatik hale getirilmiştir. Alınan çokgen kesitlerin alanlarını belirlemek için Shapely kütüphanesi kullanılmıştır.



**Şekil 3.12.** a) Konik geometriye sahip STL verisi, b) koninin orta noktasından alınan üç boyutlu kesit ve c) koninin ortasından alınan iki boyutlu kesit

## **4. BULGULAR ve TARTIŞMA**

Bu bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Bu bulgular üzerinde tartışmalar gerçekleştirilerek ilgili başlıklarda sunulmuştur.

### **4.1. Yapı Oryantasyonunun Parçanın Geometrik Doğruluğu Üzerinde Etkisinin İncelenmesi**

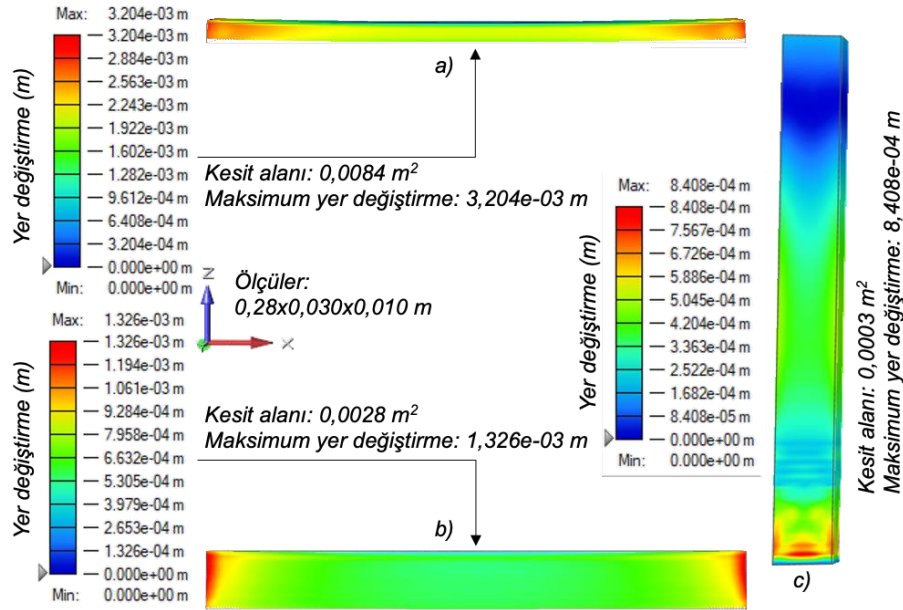
SLM prosesinin en önemli dezavantajlarından biri, hızlı ısınma ve soğuma döngülerinde oluşan kalıntı gerilmelerdir. Kalıntı gerilmeler, bazı hatalara sebep olarak, üretilen parçanın mekanik özellikleri ve geometrik doğruluğu üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Bu nedenle, çoğu eklemeli imalat prosesinden farklı olarak, SLM prosesinde, sıcaklığın düzgün dağılımını sağlayarak etkiyi en aza indirmek ve kalıntı gerilmelerden dolayı oluşabilecek hataları önlemek için yapı oryantasyonu ve destek yapıları önem arz etmektedir.

Yapı oryantasyonu dilimlenmiş katmanların sayısını ve bu katmanların kesit alanı dağılımını belirlemektedir. Tez kapsamında katmanların kesit alanlarının geometrik doğruluğa etkileri üç başlık altında incelenmiştir.

#### **4.1.1. Ortalama kesit alanının etkisi**

Her üç doğrultuda da sabit kesit alanına sahip bir test numunesi üzerinde üç farklı yüzün temel alındığı üç farklı yapı oryantasyonu için SLM proses simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de gösterilen test numunesi belirli bir yönde dilimlendikten sonra kesit alanı tüm katmanlarda aynı olmaktadır. Bu nedenle, ortalama kesit alanı, tabla üzerine yerleştirildiği yüzey ile aynı olmaktadır. Böylece, 4.1.2 ve 4.1.3 başlıklarında incelenen diğer etmenlerin geometrik doğruluk üzerindeki etkisi ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.1a'da verilen yapı oryantasyonunda kesit alanının ortalama değeri  $0,0084 \text{ m}^2$  olarak hesaplanmıştır ve ilgili numune için olabilecek en büyük ortalama kesit alanını temsil etmektedir. Bu yapı oryantasyonunda parça üzerinde meydana gelen maksimum yer değiştirme  $3,204 \times 10^{-3} \text{ m}$  olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1b ve Şekil 4.1c'de verilen  $0,0028$  ve  $0,0003 \text{ m}^2$  ortalama kesit alanları için parçalarda meydana gelen maksimum yer değiştirmeler sırasıyla  $1,326 \times 10^{-3} \text{ m}$  ve  $8,408 \times 10^{-4} \text{ m}$  olarak ölçülmüştür. Verilen yapı

oryantasyonlarında üretim süreleri ise sırasıyla 5 233, 5 988 ve 30 455 s olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.1.** Üretim doğrultusu boyunca kesit alanı değişmeyen test numunesi için gerçekleştirilen proses simülasyonları (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

Yapı oryantasyonu sonucunda oluşan ortalama kesit alanı ( $A_m$ ) iki şekilde tespit edilebilir. Bu yöntemlerden ilki Denklem (4.1)'de verilmiştir ve dilimlenen parçadaki tüm katmanlar için alanın hesaplanmasını gerektirir. Diğer yöntem ise parça hacminin üretim doğrultusundaki parça boyuna bölünmesidir. Bu yöntemin hesaplama yükü oldukça az olmasına karşın gerçeğe çok yakın sonuçlar vermektedir.

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^{L_c} A_{cs_i}}{L_c} \quad (4.1)$$

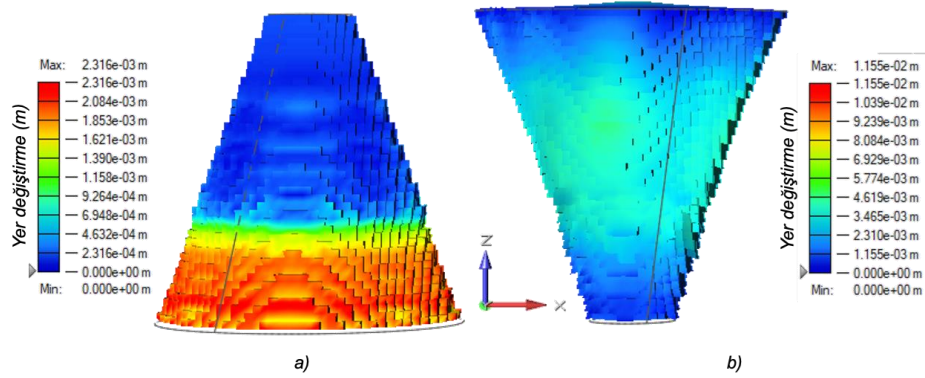
Burada  $A_{cs_i}$   $i$ 'inci katmandaki kesit alanını temsil etmektedir.

Analiz sonuçları, ortalama kesit alanındaki artışın, parçada oluşan maksimum yer değiştirmeyi de artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, parçanın üretim doğrultusundaki boyunda meydana gelen artış, SLM işleminin üretim süresini önemli

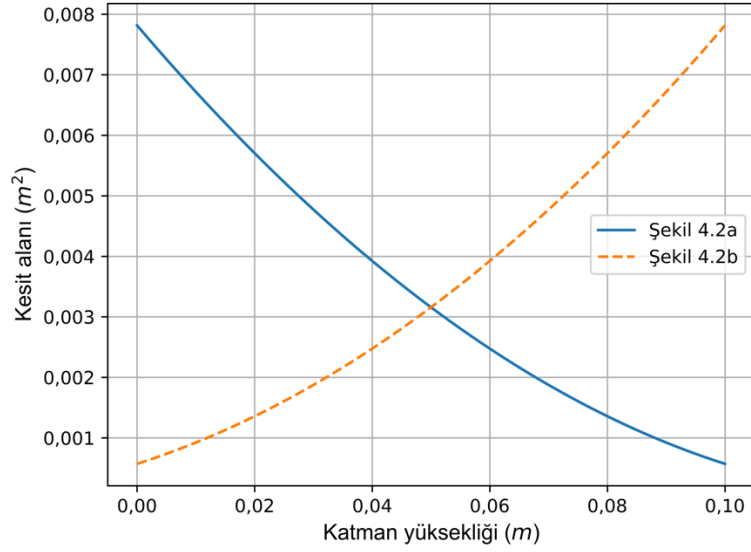
ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, yapı yönelimini optimize etmek için kesit alanı ve üretim süresinin ortalama değeri birlikte değerlendirilmelidir.

#### 4.1.2. Üretim doğrultusundaki kesit alanı dağılımının etkisi

İki farklı yapı oryantasyonunda aynı ortalama kesit alanına sahip koni şeklinde bir test numunesi tasarlanmıştır. Böylece ortalama kesit alanının geometrik doğruluk üzerindeki etkisi ortadan kaldırılmıştır. Her iki yapı oryantasyonunda da ortalama kesit alanlarının aynı olmasına rağmen Şekil 4.2b'deki maksimum yer değiştirmenin Şekil 4.2a'dakinden yaklaşık beş kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedeni, üretim doğrultusu boyunca katmanların kesit alanlarının artma ve azalma davranışlarıdır (Şekil 4.3). Üretim doğrultusunda tabladan yükseldikçe kesit alanındaki artışın geometrik doğruluğu olumsuz etkilediği açıkça görülmektedir. Bu etkinin, SLM prosesinde yapı oryantasyonu optimize ederken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri olarak kabul edilebileceği görülmüştür. Ancak, bu etkiyi nispeten karmaşık bir parça üzerinde değerlendirmek oldukça zor olacaktır. Şekil 4.2'de bulunan analiz sonuçları incelenirken renk skalasının a ve b için özel olduğuna dikkat edilmelidir.



**Şekil 4.2.** a) Üretim doğrultusunda kesit alanı azalan yapı oryantasyonu ve b) üretim doğrultusunda kesit alanı artan yapı oryantasyonu (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)



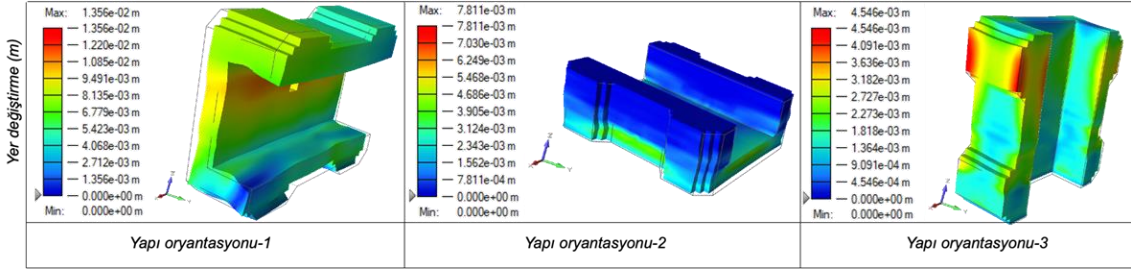
**Şekil 4.3.** Koni şeklindeki numune için üretim doğrultusundaki kesit alanı dağılım grafiği (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

#### 4.1.3. Ani kesit değişimlerinin etkisi

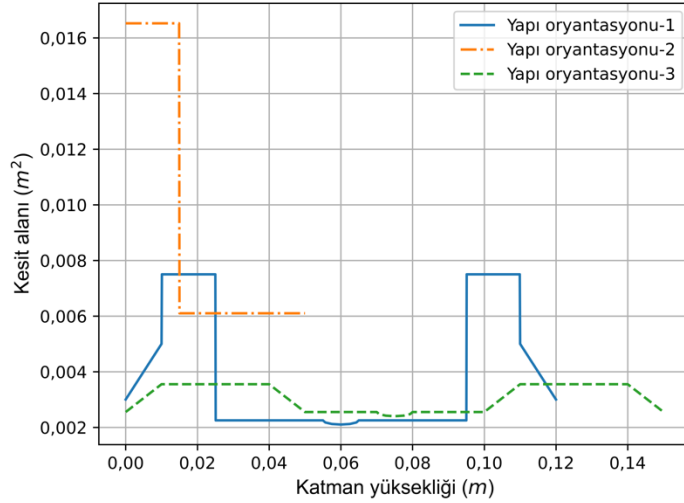
Şekil 4.4'te gösterilen parça, önceki iki örneğe kıyasla nispeten daha karmaşık bir parçadır ve değerlendirilmesi de eşit derecede daha zordur. Bu örnekte, ortalama kesit alanı, üretim doğrultusu boyunca kesit alanlarındaki değişim ve üretim doğrultusu boyunca ani kesit alanı değişiklikleri incelenmiştir. Şekil 4.5'te birinci yapı oryantasyonundaki ani kesit alanı değişimi büyüklüğünün ve ortalama kesit alanının, ikinci yapı oryantasyonundan daha az olduğu görülmektedir. Bu durumda başlık 4.1.1'deki ortalama kesit alanının etkisi göz önünde bulundurulduğunda birinci yapı oryantasyonunun geometrik doğruluğunun daha iyi olması, başlık 4.1.2'deki üretim doğrultusunda kesit alanı değişim davranışı düşünüldüğünde ise ikinci yapı oryantasyonunun daha iyi olması beklenmektedir. Sonuçlar incelendiğinde birinci yapı oryantasyonunda her ne kadar ortalama kesit alanı daha az olsa da üretim doğrultusundaki ani kesit artışı geometrik doğruluğu oldukça kötü etkilemiştir. Bu nedenle birinci yapı oryantasyonunda maksimum yer değiştirme,  $1,356 \times 10^{-2}$  m olarak ölçülmüştür. İkinci yapı oryantasyonu incelendiğinde açıkça görülmektedir ki kesit alanındaki ani değişimler yalnızca artış gösteriyorsa geometrik doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Yani başlık 4.1.2'de irdelenen kesit alanındaki değişim davranışı etkisi ile bütünleşmektedir. Üçüncü yapı oryantasyonundaki grafiksel davranış ikinci yapı oryantasyonuna benzer görünse de kesit alanının ortalama değeri ve kesit alanlarındaki değişikliklerin büyüklüğü oldukça azdır. Dolayısıyla bu yapı



oryantasyonunda maksimum yer değişirme  $4,546 \times 10^{-3}$  m olarak ölçülmüştür ve geometrik doğruluk açısından en iyi yapı oryantasyonu olarak belirlenmiştir.



**şekil 4.4.** Test numunesinin üç farklı yapı oryantasyonu için gerçekleştirilen proses simülasyonları (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)



**şekil 4.5.** Üç farklı yapı oryantasyonunda üretim doğrultusu boyunca kesit değişimleri (Günaydın ve ark. 2022'den değiştirilerek alınmıştır)

#### 4.1.4. Bulguların değerlendirilmesi

Bu araştırmada, yapı oryantasyonu ve dilimleme sonucunda oluşan tabakaların kesit alanlarının geometrik doğruluk üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İlk olarak, termo-mekanik analizler sonucunda ortalama kesit alanının etkisi belirlenmiştir. Tek başına kesit alanlarının ortalama değerinin değerlendirilmesi, üretilecek parçada oluşacak maksimum yer değişirmeyi en aza indirmek için kullanılabilir. Ancak, parçanın boyutunun üretim doğrultusunda arttırılmasının üretim süresini önemli ölçüde arttırdığı açıktır. Bu nedenle, kesit alanlarının ortalama değeri ve parçanın sınırlayıcı kutusunun yapı yönündeki boyutu birlikte değerlendirilmelidir.

Termo-mekanik analizler, SLM prosesinde üretim doğrultusu boyunca kesit alanının monoton olarak azaltılmasının daha iyi bir geometrik doğruluğa ulaşmak için uygun olduğunu göstermiştir. Üretim doğrultusu boyunca enine kesit alanlarındaki değişim davranışı, SLM sürecinde yapı oryantasyonunu optimize ederken dikkatli olunması gereken en önemli etkilerden biri olarak kabul edilebileceği anlaşılmıştır. Ancak bu etkiyi karmaşık parçalar üzerinde değerlendirmek zordur. Ani değişiklikler geometrik doğruluk üzerinde kötü bir etkiye sahiptir, özellikle anlık artış davranışı SLM sürecini önemli ölçüde etkiler. Yapılan çalışma kapsamında SLM prosesinde geometrik doğruluk açısından en uygun yapı oryantasyonunu belirlemek için bir perspektif sağlamak istenmiştir. Eklemeli imalat proses simülasyonlarının hesaplama yükü oldukça fazladır ve teorik olarak sınırsız yapı oryantasyonu olabileceği düşünüldüğünde bu analizlere bağlı kalmadan bazı geometrik özellikleri değerlendirerek bir öngörü sağlamak oldukça önemlidir.

Belirlenen etkiler ışığında geliştirilen yazılım ile bazı yapı oryantasyonlarını değerlendirerek en uygun olanı seçmek için bir öngörü sağlanabilir. Çalışmaların ilerletilmesiyle bir amaç fonksiyonu oluşturularak global optimumun aranması da mümkün olabilir.

#### **4.2. Destek Yapısı Miktarı Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması**

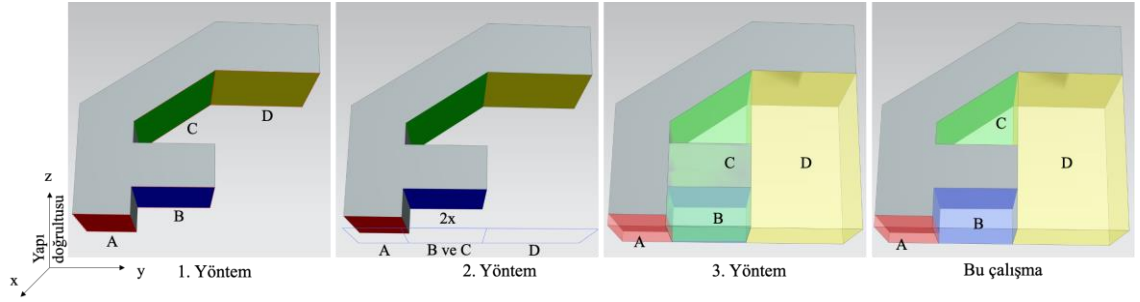
Destek yapısı hacmini doğru bir şekilde tahmin etmenin en iyi yöntemi, ilgili yapı oryantasyonunda istenen destek yapısı tipini oluşturmaktır. Ancak optimizasyon algoritmasının her adımında destek yapılarının üretilmesi, hesaplama yükünü büyük ölçüde artıracaktır. Bu nedenle literatürde birçok tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Yüzey tabanlı yaklaşımlarda, yapı yönünde sarkan yüzeylerin konumu dikkate alınmadığından hata miktarı çok yüksektir. Ancak bu yöntemler, destek yapılarının yüzey kalitesi üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılabilir. Destek yapısı gereksiniminin hacmini tahmin etmek için daha doğru sonuçların alınabileceği hacim tabanlı yöntemler de vardır. Tez kapsamında ise, destek yapıları ile parçanın kendisinin geometrisi arasındaki kesişimler incelenerek gerçeğe yakın sonuçların elde edildiği hacim tabanlı yeni bir yöntem kullanılmıştır. Ek olarak, destek yapılarının tipine ve farklı tasarım parametrelerine bağlı olarak, destek yapısı gerekli olan hacim kısmen doldurulmaktadır.

Bu durumu yansıtmak için kafes yapılarında kullanılan hacim oranına benzer bir yaklaşım kullanılmıştır. Böylece destek yapılarının hacmi gerçeğe oldukça yakın olarak tahmin edilmiştir. Destek yapısı miktarının orantılı olarak tahmin edilmesi destek yapısı miktarının optimizasyonu için yeterli olsa da destek yapısının hacminin, üretim süresinin tahmini için gerekli olan bir değişken olması nedeniyle, doğru bir şekilde elde edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Destek yapısı gereksinimini hesaplamak için kullanılan yöntemler ve bu çalışmada uygulanan yöntem arasındaki farkları ortaya koyabilmek için farklı tasarım unsurlarını içeren bir numune üzerinde Şekil 4.6'da gösterilen karşılaştırma yapılmıştır. A, B, C ve D olmak üzere tanımlanan her bir sarkan yüzey için ayrı ayrı destek yapısı miktarı hesaplanmıştır ve Çizelge 4.1'de verilmiştir. Destek yapısı miktarının optimizasyonu için gerçekçi değerlerin elde edilmesine gerek yoktur. Destek yapısı miktarını temsil etmesi için oransal olarak gerçek durumu yansıtabilmesi yeterlidir. Ancak yapılan karşılaştırmada görüldüğü üzere kullanılan yöntemlerde bazı hatalar mevcuttur. A unsuru referans alınarak hesaplanan  $\%error$  değerleri Denklem (4.2) ile hesaplanmıştır.

$$\%error = \left( 1 - \frac{\frac{A_{method}}{Feature_{method}}}{\frac{A_{real}}{Feature_{real}}} \right) 100 \quad (4.2)$$

$A_{method}$ , A unsuru için ilgili yöntem kullanılarak hesaplanan destek yapısı gereksinimi miktarını temsil etmektedir.  $A_{real}$  ise destek yapısı gereksinimine ihtiyaç duyulan hacmin gerçek değeridir.  $Feature_{method}$ , ilgili unsur için (B, C veya D) ilgili yöntem ile elde edilen destek yapısı gereksinimi miktarını sembolize etmektedir. Benzer şekilde  $Feature_{real}$  ise ilgili unsur için destek yapısı gereksinimine ihtiyaç duyulan hacmin gerçek değeridir.



**Şekil 4.6.** Destek yapısı gereksiniminin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

**Çizelge 4.1.** Destek yapısı gereksinimi (SR) hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (A unsuru referans alınarak)

	1. Yöntem		2. Yöntem		3. Yöntem		Bu çalışma		Gerçek
	SR (mm <sup>2</sup> )	% hata	SR (mm <sup>2</sup> )	% hata	SR (mm <sup>3</sup> )	% hata	SR (mm <sup>3</sup> )	% hata	SR (mm <sup>3</sup> )
<b>A</b>	4 915	-	4 915	-	49 152	-	49 152	-	49 152
<b>B</b>	7 372	-253,19	7 372	-253,19	260 382	0	260 382	0	260 382
<b>C</b>	9 000	-275,24	7 372	-358,11	886 347	61,9	337 735	0	337 735
<b>D</b>	10 000	-1 379,7	10 000	-1 379,7	1 479 757	0	1 479 757	0	1 479 757

Birinci ve ikinci yöntem ile alan temelli bir değerlendirme yapılmaktadır. Bu nedenle sarkan yüzeyin üretim doğrultusundaki yüksekliği arttıkça hata miktarı da artmaktadır. Üçüncü yöntemde ise C unsurundaki destek yapısı gereksinimi sarkan fasetten tablaya kadar hesaplanmıştır. Ancak oluşturulacak destek yapıları Şekil 4.6 üçüncü yöntemde olduğu gibi bazı durumlarda parçanın kendi geometrisi ile kesişebilmektedir. Üçüncü yöntemde kesişim kontrolü yapılmadığı için destek yapısı miktarı olması gerekenden daha fazla olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen tahmin yönteminde ise sarkan yüzeyde bulunan her bir fasetin orta noktasından bir ışın gönderilerek kesişme durumu kontrol edilmiştir. Böylece daha doğru bir tahmin yapılmasına olanak sağlanmıştır. Ancak ışın gönderilen faset ile kesişimin olduğu faset tam olarak örtüşmüyor olabilir. Bu durumda sonuçlar, kesişmelerin dışarısında kalan alanın yapı doğrultusunda oluşturduğu hacim kadar olması gerekenden daha az veya daha fazla elde edilebilir. STL verisinde ağ yapısının boyutu ne kadar küçükse değerlendirme de o derece doğru olarak elde edilmektedir. Ancak düşük ağ boyutu işlem süresini ve hesaplama yükünü artırmaktadır.

Yapılan karşılaştırmadan görüldüğü üzere birinci ve ikinci yöntem ile elde edilen sonuçlar destek yapısı miktarının belirlenmesi için oldukça yetersizdir. Ancak bu iki yöntem destek yapılarının yüzey kalitesine etkisi gibi farklı faktörlerin kontrolünde kullanılabilir.

### **4.3. Yapı Oryantasyonunun Çok-amaçlı Optimizasyonu**

Destek yapısı miktarını mümkün olduğunca doğru bir şekilde tahmin etmek, üretim süresini doğru bir şekilde tahmin edebilmek için büyük bir avantaj sağlanmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte üretim sırasında birden fazla lazer kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca ileri seviye uygulamalarda parçanın kalitesini artırmak için parçanın dış yüzeyi ve iç kısmı için farklı tarama hızları kullanılmaktadır. Literatürde üretim süresini tahmin için geliştirilen modellerde dikkate alınmayan bu gibi faktörler tez kapsamında ele alınmıştır.

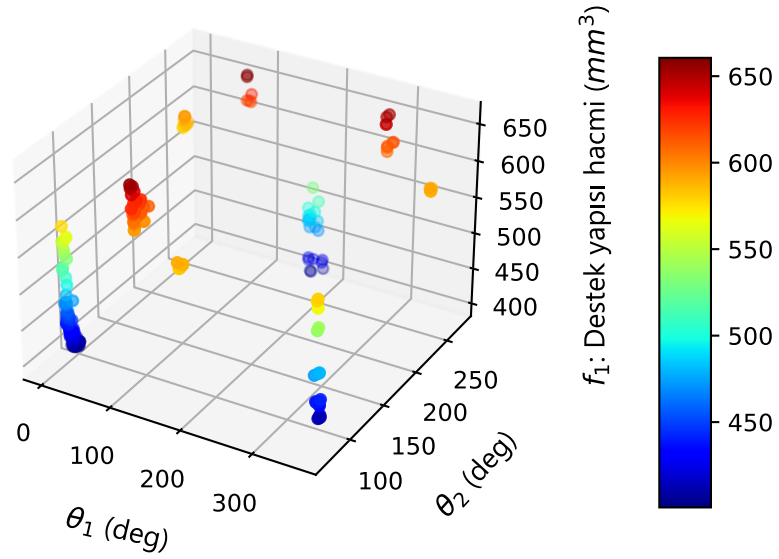
Dördeyler üç boyutlu döndürme işlemlerini içeren uygulamaları analiz etmek için oldukça etkili bir yöntemdir. Tez kapsamında gerçekleştirilen yoğun döndürme işlemi gerektiren optimizasyon sürecinde dördeyler kullanılmıştır. Dördeylerin döndürme işlemlerinde tercih edilmesi ile döndürme matrisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalara göre harcanan sürenin %5,21 daha az olduğu gözlemlenmiştir. Verimliliği test etmek için dördeyler ve döndürme matrisi kullanılarak aynı parça üzerinde x ve y eksenleri etrafında on bin döndürme işlemi gerçekleştirilmiştir ve bu işlem dört kez tekrarlanmıştır.

Şekil 3.11’de gösterildiği gibi, havacılık braketleri birçok farklı özelliğe sahiptir. Parçanın karmaşıklığı nedeniyle, destek yapılarının hacmini ve aynı anda üretim süresini en aza indirecek optimum yapı oryantasyonunu ilk bakışta belirlemek oldukça zordur ve hataya açıktır. Destek yapısı hacmi, üretim süresi tahmininin bir değişkeni olduğundan, yalnızca bir amacı optimize etmenin yeterli olabileceği düşünülebilir. Ancak Denklem (3.13)’te görüldüğü gibi üretim süresini etkileyen bir diğer faktör de parçanın ilgili oryantasyonda üretim doğrultusu boyunca uzunluğudur. Destek yapısı miktarı ile üretim süresi arasındaki ilişki konusunda literatürde genel bir yanlış anlama vardır. Destek yapısının üretimi ek süre gerektirdiğinden, destek yapısı miktarı azaldığında üretim süresinin de basit bir anlamda azalacağı düşünülmektedir. Bu ifade, üretim doğrultusundaki parça boyunun birebir aynı olduğu aynı yapı oryantasyonu için geçerlidir. Farklı yapı

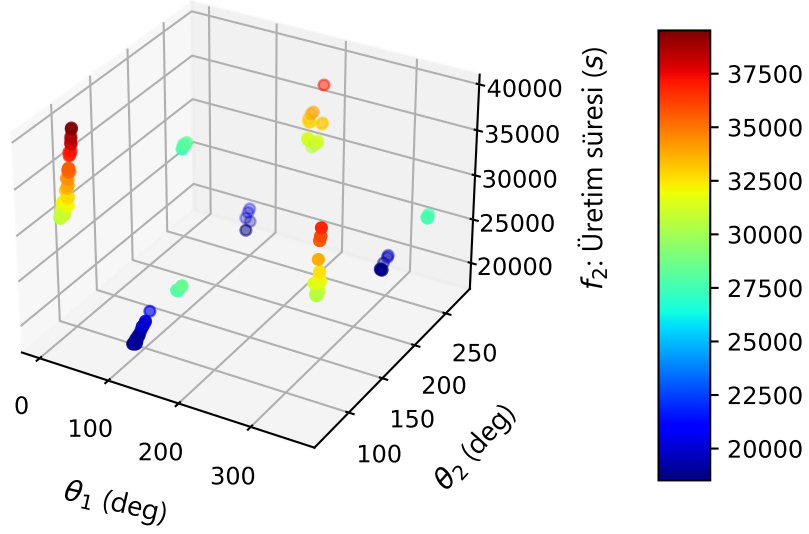
oryantasyonlarında ise destek yapısı miktarı daha az olmasına rağmen, üretim doğrultusunda parçanın maksimum uzunluğuna bağlı olarak üretim süresi daha yüksek olabilir. Bu nedenle, bu iki parametre çelişkili olarak kabul edilebilir ve birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada lazer sayısı bir olarak alınmıştır. Bu değişken iki olarak alınırsa, destek yapılarının hacminin üretim süresine etkisi azalacak ve üretim doğrultusundaki parça uzunluğunun etkisi önemli ölçüde artacaktır.

Havacılık braketi için destek yapısı hacmi ve üretim süresi olmak üzere her iki amaç fonksiyonuna genel bir bakış sunan çözüm kümeleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Tüm amaç fonksiyonlarının çoklu yerel optima ile dışbükey olmadığı gözlemlenebilir.

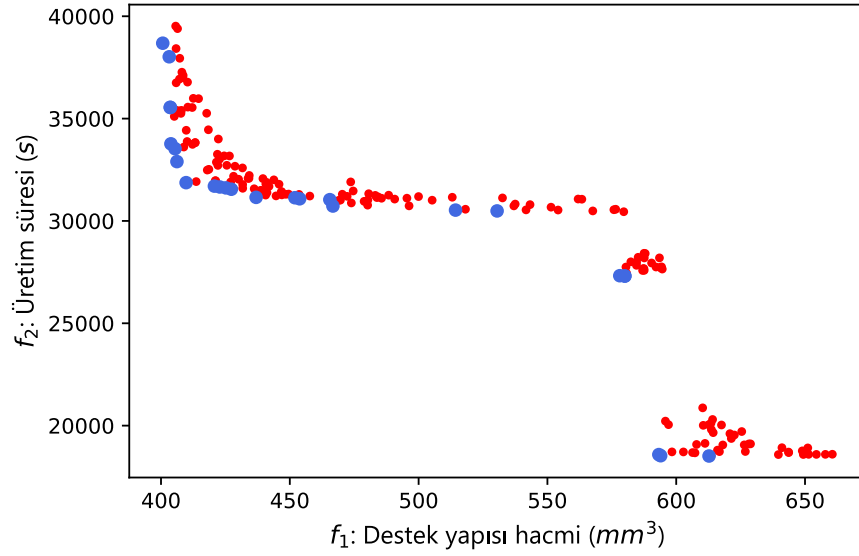


**Şekil 4.7.** Destek yapısı hacmi için elde edilen sonuçlar



**Şekil 4.8.** Üretim süresi için elde edilen sonuçlar

Destek yapısı hacmi ve üretim süresi için çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözümü Şekil 4.9’da verilmiştir. Grafikte nispeten daha küçük kırmızı noktalar çözüm kümesini, daha büyük mavi noktalar ise bu küme içerisinde seçilen bastırılmamış çözümleri barındıran Pareto cephesini temsil etmektedir. Amaç fonksiyonlarının birbiriyle çeliştiği açıkça görülmektedir. Bu gibi durumlarda, daha geniş bir perspektiften bakmak için amaç fonksiyonlarının eş-zamanlı değerlendirilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir. Yani Denklem (2.3)’te bulunan çok-özellikli tek-amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesi ile elde edilen tek bir sonuç her zaman en iyi alternatifi sunmayabilir.



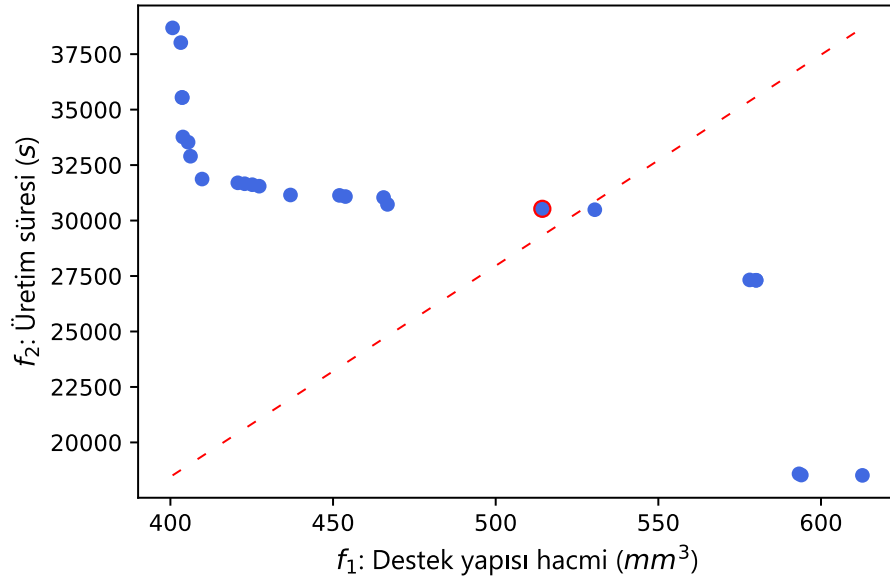
**Şekil 4.9.** Destek yapısı hacmi ve üretim süresi için elde edilen çözümler ve Pareto cephe

Çok-amaçlı optimizasyon probleminin çözülmesiyle elde edilen bastırılmamış çözüm kümesi birçok alternatif sonucu barındırmaktadır ve uygulamak için tek bir çözüm seçilmelidir. Bu seçimi yapmak için, skaler hale getirilmiş ve toplanmış bir fonksiyonun değeri hesaplanmıştır. Fonksiyonun minimum değerine göre uzlaşmalı programlama yöntemi kullanılarak bir çözüm seçilmiştir. Ayırıştırma, çok-amaçlı optimizasyon problemini birçok tek-amaçlı optimizasyon problemine dönüştürür ve amaç fonksiyonlarını istenilen ağırlıklarla değerlendirerek, bastırılmamış çözüm alternatiflerinden birini optimum olarak seçer. Normalleştirilmiş verilerden bir karar vermek için uzlaşmalı programlama ve ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Verilen ağırlıklara göre elde edilen üç optimum yapı oryantasyonu Çizelge 4.2, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 verilmiştir.

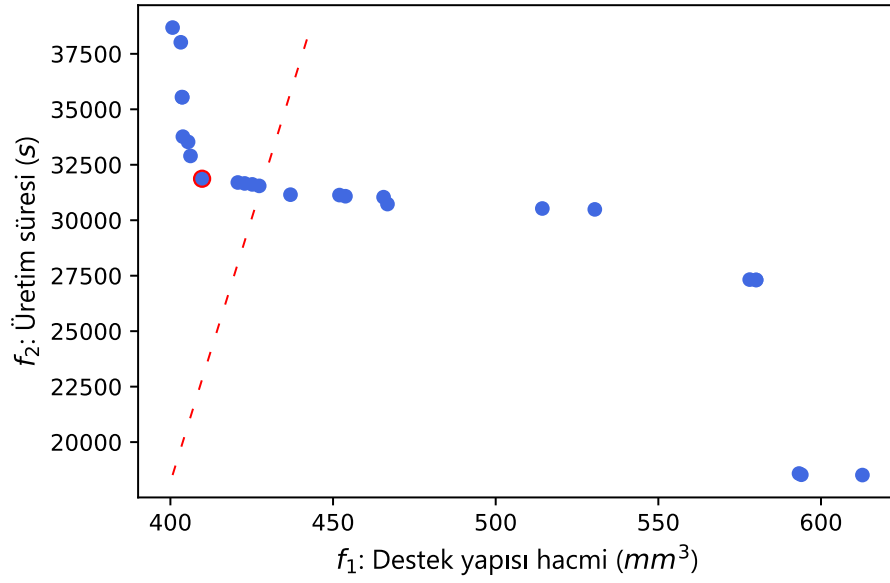
**Çizelge 4.2.** Farklı ağırlıklar için geliştirilen karar-verme algoritması ile elde edilen sonuçlar

Yapı oryantasyonu	Ağırlıklar ( $w_1, w_2$ )	$\theta_x$ (°)	$\theta_y$ (°)	$f_1$ (mm <sup>3</sup> )	$f_2$ (s)
1	(0,5, 0,5)	7,2714	85,1750	409,74	31 870,62
2	(0,8, 0,2)	172,5099	267,5453	403,84	33 767,60
3	(0,2, 0,8)	102,2662	85,9575	593,95	18 529,67

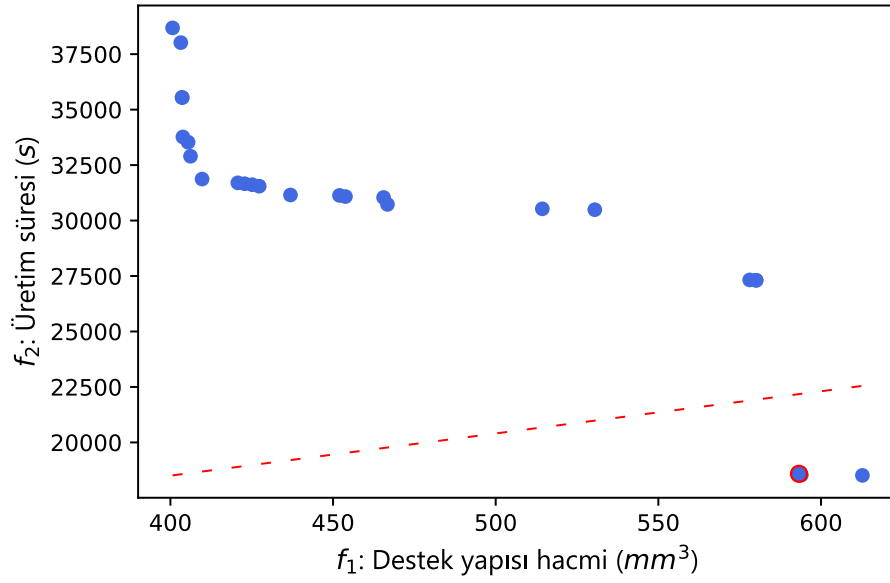




Şekil 4.10. Yapı oryantasyonu 1: her iki amaç fonksiyonunun da eşit öneme sahip  $(w_1, w_2) = (0, 5, 0, 5)$

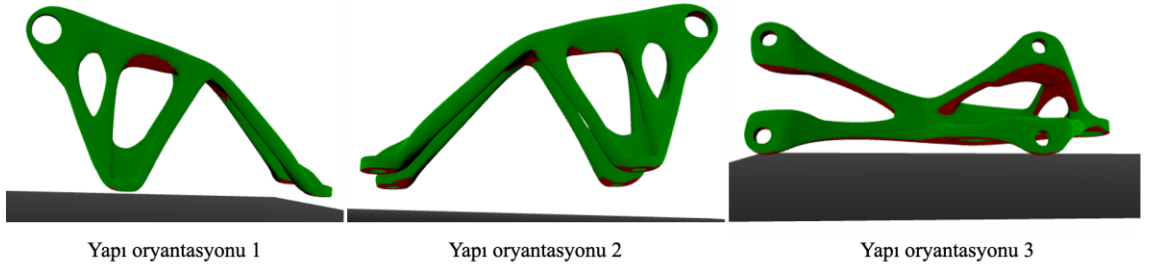


Şekil 4.11. Yapı oryantasyonu 2: destek yapısı miktarı daha önemli  $(w_1, w_2) = (0, 8, 0, 2)$



**Şekil 4.12.** Yapı oryantasyonu 3: üretim süresi daha önemli  $(w_1, w_2) = (0, 2, 0, 8)$

Çizelge 4.2’de bulunan birinci yapı oryantasyonunda her iki amaç fonksiyonunun da eşit öneme sahip olduğu durum değerlendirilmiştir. Şekil 4.10’da görünen kırmızı kesikli çizgi her iki amacın da eşit öneme sahip olduğunu temsil etmektedir. İlk bakışta optimum sonucun kesikli çizgiye en yakın konumda yer çözüm olacağı düşünülebilir. Ancak, üretim süresindeki azalmanın destek yapısı hacmindeki artışa oranı göz önüne alındığında, bu çözümün seçilebilecek en iyi çözüm olmadığı değerlendirilebilmektedir. Böylece geliştirilen karar-verme algoritması ile kar/zarar analizi yapılarak optimum çözüm seçilmiştir. Benzer şekilde ikinci yapı oryantasyonu için destek yapısının miktarı ve üçüncü yapı oryantasyonu için ise üretim süresi önceliklendirilmiştir. Birinci yapı oryantasyonuna kıyasla, ikinci yapı oryantasyonunda destek yapısı miktarı %1,44 oranında azalırken, üretim süresi %5,96 oranında artmıştır. İkinci yapı oryantasyonunun büyük bir avantaj sağlamadığı görülmektedir. Üçüncü yapı oryantasyonunda ise destek yapısı hacmi birinci yapı oryantasyonuna göre %47,08 artarken, üretim süresi %45,13 oranında azalmıştır. Üçüncü yapı oryantasyonunda destek yapısı hacmindeki artışa rağmen üretim süresinin önemli ölçüde azalmasının sebebi Şekil 4.13’te görüldüğü gibi üretim doğrultusundaki parça uzunluğudur. Bu durumda parçanın kalitesi veya fire miktarı dikkate alınırsa birinci yapı oryantasyonu, üretim süresi veya üretim maliyeti dikkate alınırsa üçüncü yapı oryantasyonunun seçilmesi uygun olacaktır.



**Şekil 4.13.** İncelenen üç yapı oryantasyonunun tabla üzerindeki gösterimi

Alış-uçuş oranı (*buy-to-fly ratio*) üretim sırasında başlangıçtaki malzemenin kütlesinin, bitmiş parçanın kütlesine oranı olarak tanımlanabilir ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Birinci, ikinci ve üçüncü yapı oryantasyonlarında alış-uçuş oranları sırasıyla 1,0774, 1,0763 ve 1,1122 olarak belirlenmiştir. Alış-uçuş oranları açısından bir değerlendirme yapıldığında üç yapı oryantasyonunda da çok büyük farklar olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda havacılık braketini için kullanılan destek yapısı hacminin üretilen parça hacmine oranla çok yüksek olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle, üçüncü yapı oryantasyonundaki %47,08'lik destek yapısı hacmindeki artış, havacılık braketinin geometrisine bağlı olarak üretim süresindeki azalmaya karşı önemini yitirmektedir. Böylece, alış-uçuş oranı dikkate alındığında üçüncü yapı oryantasyonunun daha uygun olduğu söylenebilir. Ancak bazı durumlarda yüzey kalitesi ve malzemenin yorulma davranışı daha önemli olabilir. Bu durumda destek yapılarının olumsuz etkilerini en aza indirmek için destek yapısı miktarının en az olduğu yapı oryantasyonu da tercih edilebilir.

## 5. SONUÇ

Eklemeli imalat teknolojisi havacılık sektöründe karmaşık parçaların üretilebilmesi ve alış-uçuş oranı gibi birçok avantajından dolayı tercih edilmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinde üretim süreci temel olarak üç aşamada incelenebilir. Bunlar sırasıyla üretim öncesi hazırlık, üretim ve üretim sonrası ikincil işlemlerdir. Üretim öncesi hazırlık aşamasının üretim ve üretim sonrası ikincil işlemler üzerinde önemli bir etkisi vardır. Üretim öncesi işlemlerde en can alıcı kısım parçanın tabla üzerine hangi açılarda ve konumda yerleştirileceğinin belirlenmesidir. Çünkü yapı oryantasyonu destek yapısı miktarını, parça kalitesini, üretim süresini ve üretim maliyetini belirlemektedir. Bu parametrelerin bazıları birbiri ile çelişebilir ve karmaşık parçalar için en iyi yapı oryantasyonunun ilk bakışta belirlenmesi mümkün olmayabilir. Bu kapsamda her parçada her amaç için en iyi olacak bir çözüm bulunamayabileceği anlaşılmalıdır. Bazı amaçlara ulaşmak için diğerlerinden taviz vermek gerekebilmektedir ve bu süreç hata yapmaya oldukça müsaittir.

Günümüzde üretim öncesi işlemler çoğunlukla operatörün bilgi ve becerisine kalmıştır. Bu işlemler gerçekleştirilirken kısmen doğru olsa da hataya açık bazı bilgiler temel alınmaktadır. Üretim süresini ve maliyetini minimize etmek için parçanın tablaya üretim doğrultusunda en kısa boya sahip olacak şekilde yerleştirilmesi buna örnek olarak gösterilebilir. Her ne kadar üretim doğrultusundaki boy üretim süresi üzerinde etkili olsa da üretim süresini etkileyen diğer bir parametre de destek yapısı miktarıdır. Geometriye bağlı olarak üretim doğrultusunda en kısa boyu sağlayan yapı oryantasyonunda çok fazla destek yapısı kullanmak gerekebilir. Bu durumda üretim süresi ve maliyetinin minimize edilememesinin yanında fazla destek yapısı kullanıldığı için atık malzeme miktarı artmış olabilir. Bu durumda destek yapılarının temizlenmesi için harcanan işçilik miktarı da artacaktır. Ayrıca parçanın daha çok yüzeyi destek yapısı ile temas içerisinde olacağından parçanın yüzey kalitesinin de azalması beklenebilir. Bununla birlikte üretim doğrultusundaki boyun en az olması durumu teorik olarak tek seferde üretilecek ortalama katman alanının en fazla olduğu anlamına gelebilir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar açıkça göstermiştir ki tek seferde üretilen katman alanı arttıkça parçanın geometrik doğruluğu kötüleşmektedir.

Üretim öncesi işlemleri gerçekleştirmek için birçok yardımcı yazılım da geliştirilmiştir. Farklı yazılımlarda kullanıcıya farklı seçenekler sunulmaktadır. Ancak tek yazılım özelinde bu seçenekler sınırlıdır. Ayrıca bu yazılımlarda yapı oryantasyonunun optimizasyonu sırasında genellikle belirli bir çözünürlükteki açılar kümesi ile arama gerçekleştirilmektedir. Teorik olarak sınırsız sayıda yapı oryantasyonu vardır ve global optimum değeri bu çözünürlükte belirlenen değerler arasında yer almayabilir. Üretim öncesi hazırlık aşamasında kullanılan bu yazılımlarda genellikle operatör müdahalesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu müdahaleyi gerçekleştirebilmek için yüksek bilgi birikimi gerekmektedir. Yapı oryantasyonunun optimizasyonunun yanında bu yazılımlarda sunulan proses simülasyonları oldukça kullanışlıdır. Proses simülasyonları yardımıyla üretim sırasında ve sonrasında parça üzerinde oluşan ısı dağılımı, kalıntı gerilmeler ve geometrik doğruluk incelenebilir.

Çoğu eklemeli imalat prosesinden farklı olarak, yüksek ısı girdisi ve hızlı soğuma nedeniyle PBF-L proseslerinde eriyen katmanlarda bozulmalar ve kalıntı gerilmeler meydana gelir. PBF-L işlemlerinde destek yapısının kritik rollerinden birisi, yeni ısı işlem görmüş katmanın yüksek termal gerilme nedeniyle hasar görmesini önlemektir. Destek yapıları, parçanın başarılı bir şekilde üretilmesi için birçok kritik rolü yerine getirir de birçok soruna da neden olmaktadır. Prosesin çalışma prensibi dikkate alındığında destek yapılarının tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir. Özellikle PBF-L gibi yüksek ilk yatırım ve proses maliyetine sahip olan proseslerde destek yapılarının en aza indirilmesinin, genel parça kalitesini artırmak ve atık miktarını, kullanılan enerjiyi, harcanan zamanı ve üretim maliyetini en aza indirmek için çok önemli olduğu açıktır. Son yıllarda, destek yapısı miktarının en aza indirilmesi için farklı türde destek yapılarının üretilmesi ve optimum yapı oryantasyonunun belirlenmesi gibi üretim öncesi işlemler için bazı çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların çoğu, halihazırda yüksek bilgi birikimine sahip olunan ve nispeten kolay erişilebilen plastik malzemelerin kullanıldığı proseslerde gerçekleştirilmiştir. Metalik malzeme kullanılan prosesler üzerindeki çalışmalar ise yoğunlukla son on yıl içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle tez kapsamında, havacılık sektöründe kullanılacak işlevsel metalik parçaların üretilbildiği SLM prosesi üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Destek yapısı miktarı ile üretim süresi arasındaki ilişki konusunda literatürde genel bir yanlış anlaşılma vardır. Destek yapısının üretimi fazladan süre gerektirdiğinden, destek yapısı hacminin en aza indirildiğinde üretim süresinin de basit bir anlamda azaldığı düşünülmektedir. Bu ifade, birebir aynı yapı oryantasyonuna sahip iki aynı parça için geçerlidir. Farklı yapı oryantasyonlarında bulunan iki aynı parça için ise destek yapısı miktarı daha az olmasına rağmen, üretim doğrultusundaki parçanın maksimum boyuna bağlı olarak üretim süresi daha yüksek olabilir. Bu nedenle, bu iki parametre çelişkili olarak kabul edilebilir ve birlikte eş-zamanlı olarak değerlendirilmelidir.

Bu tez kapsamında eklemeli imalat teknolojilerinin verimli ve etkili bir biçimde kullanılabilmesi için proses başarısı ve parça kalitesi üzerinde büyük bir etkisi bulunan yapı oryantasyonunun çok-amaçlı optimizasyonu ele alınmıştır.

Üretim maliyeti, parçanın hacmine, destek yapılarının hacmine, kısmen destek yapılarının hacmiyle ilgili olan son işlem işçiliğine ve üretim süresine bağlıdır. Parçanın hacmi asla değişmeyeceğinden, üretim maliyetindeki en önemli faktörler destek yapısı hacmi ve üretim süresidir. Dolayısıyla, destek yapısı miktarı ve üretim süresinin, parça kalitesini ve üretim maliyetini etkileyen en önemli iki parametre olduğu söylenebilir. Bu nedenle bu iki parametre, PBF-L sürecinin erişilebilirliğini ve sürdürülebilirliğini geliştirmek için bu çalışmada amaç fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Çok-amaçlı optimizasyon yönteminin kullanılmasıyla birbiri ile çelişen bu iki parametre eş-zamanlı olarak değerlendirilmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisinde geometrinin yaklaşık temsili için sıklıkla kullanılan STL dosyasından, amaç fonksiyonlarını hesaplamak için Python programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. Literatürde destek yapısı miktarını hesaplamak için kullanılan alan ve hacim temelli tahmin modelleri incelenerek eksiklikleri tespit edilmiştir. Bu kapsamda destek yapılarının parçanın kendi geometrisi ile kesişebileceği öngörülerek destek yapısı gerektiren hacim gerçeğe oldukça yakın olarak tahmin edilebilmiştir. Ayrıca destek yapıları destek yapısı gerektiren hacmi tamamen doldurmamaktadır. Bu nedenle kafes yapılarındaki hacim oranı temel alınarak farklı destek yapısı tipleri için hacim oranı belirlenmiştir. Böylece üretim süresinin daha doğru hesaplanabilmesi sağlanmıştır.

Üretim süresinin hesaplanması için teknolojinin güncel durumunu yansıtan bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Birden fazla lazer kullanan sistemlerin ticarileşmesiyle birlikte üretim için kullanılan lazer sayısı da üretim süresinin belirlenmesinde bir parametre haline gelmiştir. Bu çalışmada lazer sayısı üretim süresinin hesaplanmasında bir değişken olarak kullanılmıştır. Ayrıca ileri seviye uygulamalarda yüzey kalitesini artırmak için dış konturlarda farklı lazer hızı kullanılmaktadır. Bu çalışmada yüzey konturunu ve parçanın iç bölgelerini taramak için iki farklı lazer hızı da üretim süresini tahmin etmek için değişken olarak tanımlanmıştır.

Amaç fonksiyonları doğrultusunda en iyi sonucu veren yapı oryantasyonu, sınırlayıcı kutu boyutları nedeniyle üç boyutlu yazıcı ile üretilemeyebilir. Bu çalışmada üç boyutlu yazıcının üretilebilir hacmi kısıt olarak kullanılmıştır. Böylece, farklı üç boyutlu yazıcılar için üretilebilir yapı oryantasyonu seçimi garanti edilmiştir. Çok-amaçlı optimizasyon sonucunda birbirini baskılamayan bir çözüm kümesi elde edilmiştir. Ancak bu çözümlerden bir tanesinin seçilerek uygulanması gerekmektedir. Bu seçimi gerçekleştirmek için bir karar-verme mekanizması geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar görselleştirilerek yapı oryantasyonuna geniş bir perspektiften bakılmıştır.

Bu tez kapsamında elde edilen bilgiler ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yapı oryantasyonunun değişimi sonucunda üretim maliyetini etkileyen en önemli iki parametrenin destek yapısı miktarı ve üretim süresi olduğu tespit edilmiştir.
- Destek yapısı miktarı ve üretim süresi üretilmek istenen geometriye bağlı olarak birbirini çelişebilen iki parametredir. Bu nedenle eş-zamanlı olarak değerlendirilmelidir.
- Tek-amaçlı optimizasyonda tek bir çözüm elde edilirken, çok-amaçlı optimizasyonda birbirini baskılamayan bir dizi çözüm elde edilmektedir. Böylece alternatif yapı oryantasyonlarının daha geniş bir perspektiften incelenmesi mümkün olmaktadır.
- Destek yapısı miktarının optimizasyonunda alan temelli tahmin yöntemlerinin kullanımı faset başına %1 379,7 oranına varan hatalara sebep olmaktadır.

- Destek yapısı hacmi tahmin modelinde latis yapılarındaki hacim oranına benzer bir yaklaşım kullanılarak doğruluğu artırılmıştır.
- Üretim süresi tahmin metodunda gerçeğe yakın destek yapısı tahmin modelinin kullanılması, farklı tarama hızlarının ve lazer sayısının bir değişken olarak değerlendirilmesi sebebiyle doğruluğu artırılmıştır.
- Yapı oryantasyonu sonucunda oluşan kesit alanı dağılımının geometrik doğruluk üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ortalama kesit alanının az olmasının, üretim doğrultusunda kesit alanlarının azalış eğilimi göstermesinin ve ani kesit değişimlerinin bulunmamasının geometrik doğruluk için iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- STL dosyasının döndürülmesi için dördeylerin kullanılması ile verimlilik %5,21 oranında artırılmıştır.
- Havacılık braketi için en az destek yapısı amaçlanarak gerçekleştirilen tek-amaçlı optimizasyonda destek yapısı hacmi  $397,52 \text{ mm}^3$  olarak elde edilmiştir. Ancak bu yapı oryantasyonunda üretim süresi 37 843,84 s olmaktadır. Benzer şekilde en az üretim süresi hedeflenerek gerçekleştirilen tek-amaçlı optimizasyonda da destek yapısı hacmi çok yüksek olmaktadır. Çok-amaçlı optimizasyon sonucunda her bir amaç fonksiyonundan da bir miktar feragat edilerek uzlaşma sağlanabilmektedir. Böylece destek yapısı hacmi %3.07 artarak  $409,74 \text{ mm}^3$  olurken, üretim süresi %15,78 azalarak 31 870,62 s olmuştur.
- Çok-nitelikli tek-amaçlı optimizasyon ile belirlenen ağırlıklar için tek bir çözüm elde edilmektedir. Bu işlemde öncelikle her bir amacın maksimum değerlerin tespit edilerek normalizasyon yapılması gerekmektedir. GA kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, normalizasyon ortalama 37 435,99 s sürmüştür. Destek yapısı miktarı ve üretim süresi göz önünde bulundurularak belirlenen her bir ağırlık için gerçekleştirilen optimizasyon da ise 22 268,29 s harcanmıştır. Yani toplamda üç farklı ağırlık değeri için gerçekleştirilen çok-nitelikli tek-amaçlı optimizasyon serisi 104 240,86 s sürmüştür. NSGA-II kullanılarak gerçekleştirilen çok-amaçlı optimizasyon ise ortalama 18 818,47 s sürmüştür ve



birçok alternatif çözüm elde edilmiştir. Sonuç olarak üç farklı ağırlık değeri için gerekli hesaplama yükü, çok-amaçlı optimizasyon kullanılarak, %81,95 oranında azaltılmıştır.

Bu çalışma, tüketilen enerji miktarını, atık miktarını, işlem sonrası işgücü gereksinimini ve tüm bu faktörlerle ilgili toplam maliyetleri en aza indirerek eklemeli imalat sürecinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmuştur. Yapı yönlendirme sürecini doğru bir şekilde gerçekleştirmek için gereken DfAM bilgisi, işlem öncesi aşamanın otomatikleştirilmesiyle ortadan kaldırılmıştır. Dolayısıyla eklemeli imalat teknolojisinin erişilebilirliğe de katkı sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- 3DS. (2017). *Digital Thread for Additive Manufacturing*. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/trends/digital-additive-manufacturing/>
- Ahn, D., Kim, H., & Lee, S. (2007). Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3–4), 593–606. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>
- Alexander, P., Allen, S., & Dutta, D. (1998). Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 30(5), 343–356. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00083-3](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3)
- Allaire, G., Bihr, M., & Bogosel, B. (2020). Support optimization in additive manufacturing for geometric and thermo-mechanical constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61(6), 2377–2399. <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02551-1>
- Allaire, G., & Bogosel, B. (2018). Optimizing supports for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 58(6), 2493–2515. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2125-x>
- AlphaSTAR. (2019). *GENOA 3DP Simulation*.
- Altair. (2019). *Altair® Inspire™ Print3D*. <https://www.altair.com/inspire-print3d/>
- ANSYS. (2021). *Ansys Additive Manufacturing 3D Printing Simulation Software*. <https://www.ansys.com/products/additive>
- Autodesk. (2020). *Metal Additive Manufacturing Simulation*.
- Bae, C.-J., Diggs, A. B., & Ramachandran, A. (2018). Quantification and certification of additive manufacturing materials and processes. İçinde *Additive Manufacturing* (ss. 181–213). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00006-2>
- Bartsch, K., Herzog, D., Emmelmann, C., & Lange, F. (2019). A Novel Approach to Support Structures Optimized for Heat Dissipation in SLM by Combining Process Simulation with Topology Optimization. *NAFEMS World Congress 2019, July, 25*.
- Baskett, R. (2017). *Effects of Support Structure Geometry on SLM Induced Residual Stresses in Overhanging Features* [California Polytechnic State University]. <https://doi.org/10.15368/theses.2017.91>
- Brajlih, T., Valentan, B., Balic, J., & Drstvensek, I. (2011). Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid Prototyping Journal*, 17(1), 64–75. <https://doi.org/10.1108/13552541111098644>

- Brika, S., YF, Z., M, B., & J, M. (2017). Multi-Objective Build Orientation Optimization for Powder Bed Fusion by Laser. *Industrial Engineering & Management*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000236>
- Byun, H. S., & Lee, K. H. (2006). Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3–4), 307–313. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2355-5>
- Calignano, F. (2014). Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design*, 64, 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>
- Canellidis, V., Giannatsis, J., & Dedoussis, V. (2009). Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7–8), 714–730. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2006-y>
- Cheng, L., Liang, X., Bai, J., Chen, Q., Lemon, J., & To, A. (2019). On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27(February), 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.001>
- Cheng, L., & To, A. (2019). Part-scale build orientation optimization for minimizing residual stress and support volume for metal additive manufacturing: Theory and experimental validation. *CAD Computer Aided Design*, 113, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.03.004>
- Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). *Rapid Prototyping* (3rd Editio). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/6665>
- Cloots, M., Spierings, B, A., & Wegener, K. (2013). Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. *International Solid Freeform Fabrication Symposium An Additive Manufacturing Conference*, 631–643.
- Das, P., Chandran, R., Samant, R., & Anand, S. (2015). Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. *Procedia Manufacturing*, 1, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>
- Deb, K., & Deb, K. (2014). Multi-objective Optimization. İçinde *Search Methodologies* (ss. 403–449). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7_15)
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Dolatnezhadsomarin, A., Guardiani, E., & Khorram, E. (2020). A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: the application to FDM technology. *International Journal of Advanced*

*Manufacturing Technology*, 108(1–2), 263–276. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05359-x>

- Dutta, B. (2020). Directed Energy Deposition (DED) Technology. İçinde *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00035-1>
- Feng, R., Li, X., Zhu, L., Thakur, A., & Wei, X. (2021). An Improved Two-Level Support Structure for Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67(February 2020), 101972. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101972>
- Fountas, N. A., & Vaxevanidis, N. M. (2021a). Optimization of fused deposition modeling process using a virus-evolutionary genetic algorithm. *Computers in Industry*, 125, 103371. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103371>
- Fountas, N. A., & Vaxevanidis, N. M. (2021b). Multi-objective optimization of engineering properties for laser-sintered durable thermoplastic/polyamide specimens by applying a virus-evolutionary genetic algorithm. *Computers in Industry*, 128, 103430. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103430>
- Ga, B., Gardan, N., & Wahu, G. (2018). Methodology for part building orientation in additive manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 16(1), 113–128. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2019.113-128>
- Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, 10, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.02.003>
- Gan, M. X., & Wong, C. H. (2016). Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010a). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010b). Photopolymerization Processes. İçinde *Additive Manufacturing Technologies* (ss. 78–119). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9_4)
- Giraldo-Londoño, O., Mirabella, L., Dalloro, L., & Paulino, G. H. (2020). Multi-material thermomechanical topology optimization with applications to additive manufacturing: Design of main composite part and its support structure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 363, 112812. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.112812>
- Gohlke, C. (2021). *Homogeneous Transformation Matrices and Quaternions*. github.

- Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, *10*(6), 672. <https://doi.org/10.3390/ma10060672>
- Golmohammadi, A. H., & Khodaygan, S. (2019). A framework for multi-objective optimisation of 3D part-build orientation with a desired angular resolution in additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, *14*(1), 19–36. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1526622>
- Griffiths, V., Scanlan, J. P., Eres, M. H., Martinez-Sykora, A., & Chinchapatnam, P. (2019). Cost-driven build orientation and bin packing of parts in Selective Laser Melting (SLM). *European Journal of Operational Research*, *273*(1), 334–352. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.053>
- Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, *13*(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- Günaydın, A. C., Kaya, N., & Yıldız, A. R. (2022). Effect of Build Orientation on Cross-Sectional Areas of Sliced Layers and Geometrical Accuracy in Selective Laser Melting. İçinde Z. Sen, E. Oztemel, & C. Erden (Ed.), *Recent Advances in Intelligent Manufacturing and Service Systems* (ss. 9–20). Springer Singapore.
- Guo, X., Zhou, J., Zhang, W., Du, Z., Liu, C., & Liu, Y. (2017). Self-supporting structure design in additive manufacturing through explicit topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *323*, 27–63. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.05.003>
- Gurralla, P. K., & Regalla, S. P. (2014). Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts. *Virtual and Physical Prototyping*, *9*(2), 127–138. <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.898851>
- Hehr, A., Norfolk, M., Wenning, J., Sheridan, J., Leser, P., Leser, P., & Newman, J. A. (2018). Integrating Fiber Optic Strain Sensors into Metal Using Ultrasonic Additive Manufacturing. *JOM*, *70*(3), 315–320. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2709-8>
- Heinl, P., Müller, L., Körner, C., Singer, R. F., & Müller, F. A. (2008). Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomaterialia*, *4*(5), 1536–1544. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.013>
- Hexagon. (2019). *Simulating Additive Manufacturing with Simufact Additive*. <https://www.simufact.com/simufact-additive.html>
- Hofmann, D. C., Kolodziejska, J., Roberts, S., Otis, R., Dillon, R. P., Suh, J.-O., Liu, Z.-K., & Borgonia, J.-P. (2014). Compositionally graded metals: A new frontier of additive manufacturing. *Journal of Materials Research*, *29*(17), 1899–1910. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.208>
- Hofmann, D. C., Roberts, S., Otis, R., Kolodziejska, J., Dillon, R. P., Suh, J., Shapiro, A.

- A., Liu, Z.-K., & Borgonia, J.-P. (2015). Developing Gradient Metal Alloys through Radial Deposition Additive Manufacturing. *Scientific Reports*, 4(1), 5357. <https://doi.org/10.1038/srep05357>
- Höller, C., Zopf, P., Schwemberger, P., Pichler, R., & Haas, F. (2019). Load capacity of support structures for direct machining of selective laser melted parts. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2A-2019, 1–8. <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11134>
- Howe, A. S., Wilcox, B., McQuin, C., Mittman, D., Townsend, J., Polit-Casillas, R., & Litwin, T. (2015). Modular Additive Construction Using Native Materials. *Earth and Space 2014*, 301–312. <https://doi.org/10.1061/9780784479179.034>
- Hu, K., Jin, S., & Wang, C. C. L. (2015). Support slimming for single material based additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 65, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.03.001>
- Huang, R., Dai, N., Li, D., Cheng, X., Liu, H., & Sun, D. (2018). Parallel non-dominated sorting genetic algorithm-II for optimal part deposition orientation in additive manufacturing based on functional features. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(19), 3384–3395. <https://doi.org/10.1177/0954406217737105>
- Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., & Young, P. (2013). Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1019–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020>
- Jaiswal, P., Patel, J., & Rai, R. (2018). Build orientation optimization for additive manufacturing of functionally graded material objects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1–4), 223–235. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1586-9>
- Järvinen, J. P., Matilainen, V., Li, X., Piili, H., Salminen, A., Mäkelä, I., & Nyrhilä, O. (2014). Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 56(C), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.099>
- Jhabvala, J., Boillat, E., André, C., & Glardon, R. (2012). An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1–4), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3470-8>
- Jiang, J., Stringer, J., & Xu, X. (2019). Support Optimization for Flat Features via Path Planning in Additive Manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(3), 171–179. <https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0124>
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>

- King, W., Anderson, A. T., Ferencz, R. M., Hodge, N. E., Kamath, C., & Khairallah, S. A. (2015). Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory. *Materials Science and Technology*, 31(8), 957–968. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000728>
- Krol, T. A., Zaeh, M. F., & Seidel, C. (2012). Optimization of supports in metal-based additive manufacturing by means of finite element models. *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012*, 707–718.
- Kruth, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26–36. <https://doi.org/10.1108/13552540510573365>
- Kulkarni, P., Marsan, A., & Dutta, D. (2000). A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 18–35. <https://doi.org/10.1108/13552540010309859>
- Kuo, Y. H., Cheng, C. C., Lin, Y. S., & San, C. H. (2018). Support structure design in additive manufacturing based on topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(1), 183–195. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1743-z>
- Leary, M. (2020a). Binder jetting. İçinde *Design for Additive Manufacturing* (ss. 335–339). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00013-0>
- Leary, M. (2020b). Detail DFAM. İçinde *Design for Additive Manufacturing* (ss. 91–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00004-X>
- Leary, M., Maconachie, T., Sarker, A., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures. *Materials and Design*, 183, 108138. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108138>
- Leary, M., Merli, L., Torti, F., Mazur, M., & Brandt, M. (2014). Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Materials and Design*, 63, 678–690. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.015>
- Li, A.-D., He, Z., & Zhang, Y. (2016). Bi-objective variable selection for key quality characteristics selection based on a modified NSGA-II and the ideal point method. *Computers in Industry*, 82, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.008>
- Li, A., Zhang, Z., Wang, D., & Yang, J. (2010). Optimization method to fabrication orientation of parts in fused deposition modeling rapid prototyping. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE2010*, 416–419. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535335>
- Li, Z., Zhang, D. Z., Dong, P., & Kucukkoc, I. (2017). A lightweight and support-free design method for selective laser melting. *International Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology*, 90(9–12), 2943–2953. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9509-0>
- Liou, F. W., Choi, J., Landers, R. G., Janardhan, V., Balakrishnan, S. N., & Agarwal, S. (2001). Research and Development of a hybrid rapid manufacturing process. *2001 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26153/tsw/3246>
- Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. İçinde *Laser Additive Manufacturing* (ss. 351–371). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>
- Liu, Y., Li, Z., Wei, P., & Chen, S. (2019). Generating support structures for additive manufacturing with continuum topology optimization methods. *Rapid Prototyping Journal*, 25(2), 232–246. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0213>
- Ma, W., But, W.-C., & He, P. (2004). NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 36(13), 1309–1325. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.001>
- Materialise. (2018). *Materialise Magics Simulation Module*.
- Matos, M. A., Rocha, A. M. A. C., & Costa, L. A. (2021). Many-objective optimization of build part orientation in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3–4), 747–762. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06369-5>
- Matos, M. A., Rocha, A. M. A. C., & Pereira, A. I. (2020). Improving additive manufacturing performance by build orientation optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5–6), 1993–2005. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04942-6>
- McConaha, M., Venugopal, V., & Anand, S. (2020). Integration of machine tool accessibility of support structures with topology optimization for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 48, 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.092>
- Mele, M., & Campana, G. (2020). Sustainability-driven multi-objective evolutionary orienting in additive manufacturing. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.05.004>
- Mirzendehtel, A. M., & Suresh, K. (2016). Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 81, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.08.006>
- Mishurova, T., Cabeza, S., Thiede, T., Nadammal, N., Kromm, A., Klaus, M., Genzel, C., Haberland, C., & Bruno, G. (2018). The Influence of the Support Structure on Residual Stress and Distortion in SLM Inconel 718 Parts. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49(7), 3038–3046. <https://doi.org/10.1007/s11661-018->



- Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N., & Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5), 274–288. <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>
- Möller, T., & Trumbore, B. (2005). Fast, minimum storage ray/triangle intersection. *ACM SIGGRAPH 2005 Courses on - SIGGRAPH '05*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.1145/1198555.1198746>
- Morgan, H. D., Cherry, J. A., Jonnalagadda, S., Ewing, D., & Sienz, J. (2016). Part orientation optimisation for the additive layer manufacture of metal components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5–8), 1679–1687. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8151-6>
- Murr, L. E., & Gaytan, S. M. (2014). Electron Beam Melting. İçinde *Comprehensive Materials Processing* (ss. 135–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01004-9>
- Nasr, E. A., Kamrani, A., Al-Ahmari, A., & Moiduddin, K. (2014). Digital design and fabrication of customized mandible implant. *2014 World Automation Congress (WAC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/WAC.2014.6935880>
- Navangul, G., Paul, R., & Anand, S. (2013). Error Minimization in Layered Manufacturing Parts by Stereolithography File Modification Using a Vertex Translation Algorithm. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(3). <https://doi.org/10.1115/1.4024035>
- Nematollahi, M., Jahadakbar, A., Mahtabi, M. J., & Elahinia, M. (2019). Additive manufacturing (AM). İçinde *Metals for Biomedical Devices* (ss. 331–353). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102666-3.00012-2>
- Nie, Z., Jung, S., Kara, L. B., & Whitefoot, K. S. (2020). Optimization of part consolidation for minimum production costs and time using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 142(7). <https://doi.org/10.1115/1.4045106>
- O'Neill, P., Jolivet, L., Kent, N. J., & Brabazon, D. (2017). Physical integrity of 3D printed parts for use as embossing tools. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 3(3), 308–317. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2017.1330842>
- Ö Poyraz, E Yasa, G Akbulut, A Orhangul, S. P. (2015). Investigation of Support Structures for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Of IN625 Parts. *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, 560–574.
- Oropallo, W., & Piegl, L. A. (2016). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32(1), 135–148. <https://doi.org/10.1007/s00366-015-0407-0>
- Paggi, U., Ranjan, R., Thijs, L., Ayas, C., Langelaar, M., van Keulen, F., & van

- Hooreweder, B. (2019). New support structures for reduced overheating on downfacing regions of direct metal printed parts. *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2019*, 1626–1640.
- Pandey, P. M., Venkata Reddy, N., & Dhande, S. G. (2007). Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1–3), 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.120>
- Pereira, S., Vaz, A. I. F., & Vicente, L. N. (2018). On the optimal object orientation in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5–8), 1685–1694. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2218-0>
- Pham, D. ., & Gault, R. . (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10–11), 1257–1287. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5)
- Phatak, A. M., & Pande, S. S. (2012). Optimum part orientation in Rapid Prototyping using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(4), 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.001>
- Prashanth, K. G., Scudino, S., & Eckert, J. (2017). Defining the tensile properties of Al-12Si parts produced by selective laser melting. *Acta Materialia*, 126, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.044>
- Qian, B., Zhang, L., Shi, Y., & Liu, G. (2011). Support fast generation algorithm based on discrete-marking in stereolithography rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 17(6), 451–457. <https://doi.org/10.1108/13552541111184189>
- Qin, Y., Qi, Q., Shi, P., Scott, P. J., & Jiang, X. (2020). Automatic determination of part build orientation for laser powder bed fusion. *Virtual and Physical Prototyping*. <https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1832793>
- Rocha, A. M. A. C., Pereira, A. I., & Vaz, A. I. F. (2018). Build Orientation Optimization Problem in Additive Manufacturing. İçinde *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): C. 10961 LNCS* (Sayı February 2019, ss. 669–682). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2_47)
- Sahu, N. K., & Andhare, A. B. (2019). Multiobjective optimization for improving machinability of Ti-6Al-4V using RSM and advanced algorithms. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.04.004>
- Salmasnia, A., Hasannejad, S., & Mokhtari, H. (2018). A multi-objective optimization for brush monofilament tufting process design. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1), 120–136. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.08.001>
- Shapiro, A. A., Borgonia, J. P., Chen, Q. N., Dillon, R. P., McEnerney, B., Polit-Casillas,

- R., & Soloway, L. (2016). Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53(5), 952–959. <https://doi.org/10.2514/1.A33544>
- Siemens PLM Software. (2020). *Additive Manufacturing*. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/additive-manufacturing.html>
- Sing, S. L., Tey, C. F., Tan, J. H. K., Huang, S., & Yeong, W. Y. (2020). 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. İçinde *Rapid Prototyping of Biomaterials* (ss. 17–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2>
- Sireesha, M., Lee, J., Kranthi Kiran, A. S., Babu, V. J., Kee, B. B. T., & Ramakrishna, S. (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC Advances*, 8(40), 22460–22468. <https://doi.org/10.1039/C8RA03194K>
- Skywin. (2019). *GEONX*.
- Song, X., Zhai, W., Huang, R., Fu, J., Fu, M. W., & Li, F. (2020). Metal-Based 3D-Printed Micro Parts & Structures. İçinde *Reference Module in Materials Science and Materials Engine* (ss. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00009-0>
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2(3), 221–248. <https://doi.org/10.1162/evco.1994.2.3.221>
- STL (file format)*. (2021). [https://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(file\\_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9–12), 1247–1254. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4403-x>
- Sun, S. H., Chiang, H. W., & Lee, M. I. (2007). Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(7–8), 689–701. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0651-y>
- Suryawanshi, J., Prashanth, K. G., Scudino, S., Eckert, J., Prakash, O., & Ramamurty, U. (2016). Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting. *Acta Materialia*, 115, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.009>
- Syam, W. P., Mannan, M. A., & Al-Ahmari, A. M. (2011). Rapid prototyping and rapid manufacturing in medicine and dentistry. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(2), 79–109. <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.590388>

- Taufik, M., & Jain, P. K. (2013). Role of build orientation in layered manufacturing: A review. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 27(1–3), 47–73. <https://doi.org/10.1504/IJMTEM.2013.058637>
- Thakare, S. (2020). *Experimental investigation of effect of support structure geometry on the microstructure and metallurgical properties of IN718 parts fabricated by selective laser melting*. The University of Texas at Arlington.
- Thakare, S., Ravichander, B. B., Swails, N., Shayesteh Moghaddam, N., & Amerinatanzi, A. (2020). The effect of support structure geometry on surface topography of selectively laser melted parts. İçinde R. L. Harne (Ed.), *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials IX* (s. 57). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2559112>
- Thrimurthulu, K., Pandey, P. M., & Reddy, N. V. (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004>
- Todorov, E., Spencer, R., Gleeson, S., Jamshidinia, M., & Kelly, S. M. (2014). *Nondestructive evaluation (NDE) of complex metallic additive manufactured (AM) structures*.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., ... Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Ulu, E., Korkmaz, E., Yay, K., Burak Ozdoganlar, O., & Burak Kara, L. (2015). Enhancing the Structural Performance of Additively Manufactured Objects Through Build Orientation Optimization. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(11). <https://doi.org/10.1115/1.4030998>
- Vaidya, R., & Anand, S. (2016). Optimum Support Structure Generation for Additive Manufacturing Using Unit Cell Structures and Support Removal Constraint. *Procedia Manufacturing*, 5, 1043–1059. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.072>
- Vaissier, B., Pernot, J. P., Chougrani, L., & Véron, P. (2019). Genetic-algorithm based framework for lattice support structure optimization in additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 110, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.12.007>
- Vanek, J., Galicia, J. A. G., & Benes, B. (2014). Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 33(5), 117–125. <https://doi.org/10.1111/cgf.12437>
- Wang, J.-C., Dommati, H., & Hsieh, S.-J. (2019). Review of additive manufacturing methods for high-performance ceramic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), 2627–2647.

<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03669-3>

- Wang, W. M., Zanni, C., & Kobbelt, L. (2016). Improved surface quality in 3D printing by optimizing the printing direction. *Computer Graphics Forum*, 35(2), 59–70. <https://doi.org/10.1111/cgf.12811>
- Weber, S., Montero, J., Bleckmann, M., & Paetzold, K. (2020). Parameters on support structure design for metal additive manufacturing. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1*, 1145–1154. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.14>
- Wodziak, J. R., Fadel, G. M., & Kirschman, C. (1994). A Genetic Algorithm for Optimizing Multiple Part Placement to Reduce Build Time. *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping.*, May, 201,210.
- Zhang, K., Mao, Z., Fu, G., Zhang, D. Z., Liu, C., & Li, Z. (2018). A feasible method of support slimming based on the different thresholds of polar angles in selective laser melting. *Materials and Design*, 157, 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.044>
- Zhang, L.-C., Wang, J., Liu, Y., Jia, Z., & Liang, S.-X. (2020). Additive Manufacturing of Titanium Alloys. İçinde *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00002-8>
- Zhang, Yi, Jarosinski, W., Jung, Y.-G., & Zhang, J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. İçinde *Additive Manufacturing* (ss. 39–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00002-5>
- Zhang, Yicha, & Bernard, A. (2013). Using AM feature and multi-attribute decision making to orientate part in Additive Manufacturing. İçinde *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (Sayı October, ss. 411–416). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15961-76>
- Zhang, Yicha, Bernard, A., Gupta, R. K., & Harik, R. (2016). Feature based building orientation optimization for additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 358–376. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2014-0037>
- Zhang, Yicha, De Backer, W., Harik, R., & Bernard, A. (2016). Build Orientation Determination for Multi-material Deposition Additive Manufacturing with Continuous Fibers. *Procedia CIRP*, 50, 414–419. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.119>
- Zhang, Yicha, Wang, Z., Zhang, Y., Gomes, S., & Bernard, A. (2020). Bio-inspired generative design for support structure generation and optimization in Additive Manufacturing (AM). *CIRP Annals*, 69(1), 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.091>
- Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson, J. A., Kucheyev, S. O., Fang, N. X., & Spadaccini, C. M. (2014). Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*,

344(6190), 1373–1377. <https://doi.org/10.1126/science.1252291>

Zocca, A., Colombo, P., Gomes, C. M., & Günster, J. (2015). Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(7), 1983–2001. <https://doi.org/10.1111/jace.13700>

## EKLER

### EK 1 Sözde Kodlar

```
fonksiyon STL-verisini-oku(dosya_yolu):
    dosyayı_oku(dosya_yolu + '/*.stl')
    while satır = "endsolid":
        while satır = "endfacet"
            if satır = "facet normal":
                yüzey_normalleri.ekle([nx, ny, nz])
            if satır = "vertex":
                üçgen_koordinatları.ekle([v1x, v1y, v1z], [v2x, v2y, v2z], [v3x, v3y, v3z])
                parça.üçgen_koordinatları = üçgen_koordinatları
                parça.yüzey_normalleri = yüzey_normalleri
        dön parça

fonksiyon verileri-kontrol-et(parça, düzelt=True):
    hesaplanan_yüzey_normali = yüzey_normallerini_hesapla(parça.üçgen_koordinatları)
    if hesaplanan_yüzey_normalleri != parça.yüzey_normalleri:
        print('Hatalı dosya!')
    if düzelt = True:
        parça.yüzey_normalleri = hesaplanan_yüzey_normalleri

fonksiyon kapsayıcı_kutu(parça, x_açı, y_açı):
    sanal_kopya = parça.kopyala()
    sanal_kopya.döndür(x_açı, y_açı)
    x_min = parça.üçgen_koordinatları_x.min()
    x_max = parça.üçgen_koordinatları_x.max()
    y_min = parça.üçgen_koordinatları_y.min()
    y_max = parça.üçgen_koordinatları_y.max()
    z_min = parça.üçgen_koordinatları_z.min()
    z_max = parça.üçgen_koordinatları_z.max()
    dön ([x_min, y_min, z_min], [x_max, y_max, z_max])

fonksiyon alan():
    for i=0 to len(üçgen_koordinatı):
        alan.ekle = Denklem(3.6)
    dön alan

fonksiyon hacim():
    hacim = yüzey_integrali(üçgen_koordinatı)
    dön hacim

fonksiyon yüzey_açısı(parça, x_açı, y_açı):
    sanal_kopya = parça.kopyala()
    sanal_kopya.döndür(x_açı, y_açı)
    üretim_doğrultusu = [0, 0, -1]
    açı = Denklem (3.3)
    dön açı

fonksiyon destek_yapısı_hacmi(parça, x_açı, y_açı, sarkma_açısı):
    sanal_kopya = parça.kopyala()
    sanal_kopya.döndür(x_açı, y_açı)
    mesafe_z = kapsayıcı_kutu(sanal_kopya, 0, 0)[0][2]
    sanal_kopya.ötele(minimum_mesafe-mesafe_z)
    dy_hacmi = 0
    for i=0 to uzunluk(parça.yüzey_normalleri):
        if yüzey_açısı(sanal_kopya, 0, 0)[i] < sarkma_açısı:
            konum = ışın-üçgen-kesişim()
            if uzunluk(konum) < 1:
                dy_hacmi+=sarkan_yüzey.alan*cos(yüzey_açısı)*üçgen_koordinatları_z.mean()
            elseif uzunluk(konum) = 1:
                dy_hacmi+=sarkan_yüzey.alan*cos(yüzey_açısı)*üçgen_koordinatları_z.mean()-konum
            else:
                konum = konum.sırala_azalan()[0]
                dy_hacmi+=sarkan_yüzey.alan*cos(yüzey_açısı)*üçgen_koordinatları_z.mean()-konum
    dön dy_hacmi
```

```

fonksiyon üretim_süresi(parça, x_açı, y_açı):
    hacim_oranı = 0,0730
    tarama_hızı_iç, tarama_hızı_dış = 1 250, 1 250
    katman_kalınlığı = 0,03
    serme_süresi = 20
    lazer_sayısı = 1
    tarama_mesafesi = 0,07
    sanal_kopya = parça.kopyala()
    sanal_kopya.döndür(x_açı, y_açı)
    mesafe_z = kapsayıcı_kutu(sanal_kopya, 0, 0)[0][2]
    sanal_kopya.ötele(minimum_mesafe-mesafe_z)
    parça_hacmi = parça.hacim
    dy_hacmi = destek_yapısı_hacmi(sanal_kopya, 0, 0, sarkma_açısı)
    parça_boyu = kapsayıcı_kutu(sanal_kopya, 0, 0)[1][2] - mesafe_z
    katman_sayısı = parça_boyu/katman_kalınlığı
    yüzey_alanı = parça.alan.sum()
    üretim_süresi = Denklem(3.13)
    dön_üretim_süresi

fonksiyon NSGA-II(değişkenler, amaç_fonksiyonları, kısıtlar, popülasyon, jenerasyon):
    Başlık 2.10.3. Bastırılmamış sınıflandırmalı genetik algoritma-II
    dön_sonuçlar

fonksiyon seçim(sonuçlar, w1, w2):
    uzlaşmalı_programlama(sonuçlar)
    sonuç = ağırlıklı_toplam(sonuçlar, w1, w2)
    dön_sonuç

```



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet Can GÜNAYDIN  
Doğum Yeri ve Tarihi : Yıldırım 02.10.1991  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Bursa Anadolu Kız Lisesi  
Lisans : Makine Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi  
Yüksek Lisans : Makine Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

Başlangıç-Bitiş Tarihi	Kurum/Kuruluş Adı
2018-Devam ediyor	Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
2017-2018	Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ş.

İletişim (e-posta) : ahmetcan.gunaydin@hotmail.com

### Yayımları :

Günaydın, A., Yıldız, A. & Kaya, N. (2022). Multi-objective optimization of build orientation considering support structure volume and build time in laser powder bed fusion. *Materials Testing*, 64(3), 323-338. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2075> (Doktora tezinden üretilmiştir.)

Günaydın, A. C., Kaya, N., & Yıldız, A. R. (2022). Effect of Build Orientation on Cross-Sectional Areas of Sliced Layers and Geometrical Accuracy in Selective Laser Melting. In *Recent Advances in Intelligent Manufacturing and Service Systems* (pp. 9–20). [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7164-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7164-7_2) (Doktora tezinden üretilmiştir.)