



The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures

Orhan Gülcan^{1*}, Uğur Şimşek¹, Mirhan Özdemir², Kadir Günaydın¹, Emre Tekoğlu³

¹General Electric Aviation, Tubitak Free Industrial Zone, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²Mechanical Engineering Department, Özyeğin University, 34794, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

³Department of Nuclear Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 02139, MA, USA

Highlights:

- Lattice structures produced from CoCrMo material
- Taguchi design of experiments and ANOVA analysis
- Dimensional deviations, surface roughness and wall thickness measurements

Keywords:

- Lattice structures
- Build orientation
- Volume fraction
- Powder bed fusion
- Taguchi method

Article Info:

Research Article

Received: 06.09.2022

Accepted: 01.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168768

Correspondence:

Author: Orhan Gülcan

e-mail:

orhan.gulcan@ge.com

phone: +90 262 677 8410

Graphical/Tabular Abstract

This experimental study focuses on investigating the effect of lattice structure type, build direction and volume fraction on distortion, surface roughness and wall thickness deviation of lattice structures based on Taguchi design of experiment. Laser powder bed fusion process and CoCrMo material were used for production. The effect of each parameter on distortion, surface roughness and wall thickness deviation, and optimum parameter set were found by analysis of variance (ANOVA) method (Figure A).

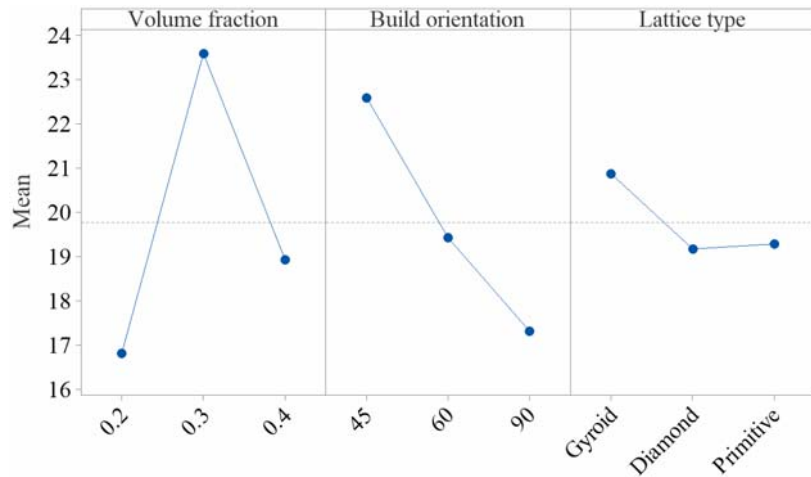


Figure A. ANOVA analysis for surface roughness

Purpose: The purpose of this study is to investigate the effect of volume fraction, lattice type and build orientation on dimensional deviation, surface roughness and ligament thickness variation of CoCrMo specimens produced by laser powder bed fusion method.

Theory and Methods: Taguchi design of experiment was used in the experiments. Specimens were produced from CoCrMo material by laser powder bed fusion method. Produced specimens were scanned with bluelight and Alicona to measure dimensional deviations and surface roughness. ANOVA analyses were performed to determine the effect of parameters on performance characteristics.

Results: Diamond specimens outperformed when compared with gyroid and primitive specimens in terms of dimensional deviations and surface roughness. For side surfaces, lattice type was found to be the most effective parameter on dimensional deviation and volume fraction was found to be the most effective parameter on surface roughness.

Conclusion: In terms of dimensional deviations and surface roughness, diamond specimen with build orientation as much parallel as build orientation need to be used. Primitive and gyroid specimens showed the highest dimensional deviation and surface roughness results. It was observed that there is an indirect correlation between build direction and distortion and surface roughness. Build direction was found to be the most effective parameter on ligament thickness deviation. The deviation between designed and produced ligament thicknesses decreased when volume fraction increased.



Üretim parametrelerinin, lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen kafes yapıların çarpılma, boyutsal değişim ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

Orhan Gülcan^{1*}, Uğur Şimşek¹, Mirhan Özdemir², Kadir Günaydın¹, Emre Tekoğlu³

¹General Electric Aviation, Tübitak Serbest Sanayi Bölgesi, 41400, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²Özyeğin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34794, Çekmeköy, İstanbul, Türkiye

³Department of Nuclear Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 02139, MA, ABD

Ö N E Ç İ K A N L A R

- CoCrMo malzemeden üretilen kafes yapılar
- Taguchi deney tasarımı ve ANOVA analizi
- Boyutsal sapma, yüzey pürüzlülüğü ve duvar kalınlık ölçümleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.09.2022

Kabul: 01.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168768

Anahtar Kelimeler:

Kafes yapılar,
inşa yönü,
hacim oranı,
toz yatağı füzyon yöntemi,
Taguchi metodu

ÖZ

Yüksek ısı transfer kabiliyeti, enerji absorbe edebilme ve ses izolasyonu özelliklerinden dolayı kafes yapılar havacılık, otomotiv ve biyomedikal sanayii başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kafes yapıların bu kabiliyetleri üzerinde farklı proses ve geometrik parametreler etkili olmaktadır. Farklı endüstriyel uygulamalarda, ilgili kafes yapısının uygun proses ve geometrik parametreler ile birlikte kullanılmasının, uygulama sonucu elde edilen verimi arttıracak bilinen bir gerçektir. Bu çalışma, Taguchi deney tasarımı kullanarak, kafes yapılarda, kafes yapı çeşidinin, inşa yönünün ve hacim oranının, üretimden sonra parçada meydana gelecek çarpılma, yüzey pürüzlülüğü ve duvar kalınlık değişimi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemeye odaklanmıştır. Üretim için lazer toz yatağı füzyon yöntemi ve CoCrMo malzeme kullanılmıştır. Her bir parametrenin çarpılma, yüzey pürüzlülüğü ve duvar kalınlık değişimi üzerindeki etkisi ve optimum parametre seti, değişkenlerin analizi (ANOVA) metodu ile bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için en optimum parametre seti elmas kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir. Duvar kalınlığındaki değişim için ise en optimum parametre seti gyroid kafes yapısı, 0,4 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir.

The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures

H I G H L I G H T S

- Lattice structures produced from CoCrMo material
- Taguchi design of experiments and ANOVA analysis
- Dimensional deviations, surface roughness and wall thickness measurements

Article Info

Research Article

Received: 06.09.2022

Accepted: 01.01.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1168768

Keywords:

Lattice structures,
build orientation,
volume fraction,
powder bed fusion,
Taguchi method

ABSTRACT

Due to their high heat transfer capabilities, energy absorption and sound insulation characteristics, lattice structures are used in different industries, especially in aviation, automotive and biomedical industries. Different process and geometric parameters are effective on these capabilities of lattice structures. It is well known that the use of suitable lattice structure together with appropriate process and geometric parameters in different industrial applications increases the efficiency obtained as a result of the application. This experimental study focuses on investigating the effect of lattice structure type, build direction and volume fraction on distortion, surface roughness and wall thickness deviation of lattice structures based on Taguchi design of experiment. Laser powder bed fusion process and CoCrMo material were used for production. The effect of each parameter on distortion, surface roughness and wall thickness deviation, and optimum parameter set were found by analysis of variance (ANOVA) method. The optimum parameter set for surface roughness was determined as diamond lattice structure, 0.2 volume fraction and 90° build orientation. On the other hand, the optimum parameter set for wall thickness deviation was determined as gyroid lattice structure, 0.4 volume fraction and 45° build orientation.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *orhan.gulcan@ge.com, ugur.simsek.16339@ozu.edu.tr, mirhan.ozdemir@ozu.edu.tr, kadir.gunaydin@ge.com, tekoglu@mit.edu / Tel: +90 262 677 8410

1. Giriş (Introduction)

Literatürde, farklı adlarla da adlandırılabilen kafes (lattice) yapılar, dikmeler ya da yüzeyler ve bunları birbirine bağlayan düğüm noktalarından oluşan üç boyutlu yapılardır [1, 2]. Yüksek ısı kabiliyeti, enerji absorbe edebilme ve ses izolasyonu özelliklerinden dolayı kafes yapılar, günümüzde hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanılma zorunluluğunun günden güne arttığı havacılık, otomotiv, spor ve biyomedikal sanayi gibi farklı alanlarda kullanılabilmektedir [3, 4]. Farklı kategorilerde sınıflandırılabilen kafes yapılar, geometrik şekillerine göre üç farklı kategoride değerlendirilebilmektedir: üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapılar (triple periodic minimum surfaces, TPMS), dikme tabanlı kafes yapılar ve kabuk kafes yapılar [5]. Her ne kadar farklı konvansiyonel üretim yöntemleri kullanılarak üretilmeleri mümkün ise de, eklemeli imalat yöntemlerinin son yıllarda elde ettiği gelişim neticesinde, kafes yapıların eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmeleri üzerine yapılan çalışmalar da ivme kazanmıştır [6]. Bunda, eklemeli imalat teknolojileri ile üretimde, daha az malzeme, zaman ve enerji kullanımının olması da ciddi bir etkidir [7]. Lazer toz yatağı füzyon yöntemi, ASTM F42 komitesine göre (The American Society for Testing and Materials Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies) yedi farklı kategoride değerlendirilen [8] eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan toz yatağı füzyon yöntemlerinin bir alt kolu olup, lazer enerji kaynağı kullanarak bir basım plakasının üzerine serilen metal tozların, daha önceden belirlenen bir lazer yoluna göre katman ergitilmesi esasına dayanır [9, 10]. Ham malzemeden talaş kaldırarak üretme esasına dayanan konvansiyonel üretim yöntemlerinin aksine, lazer toz yatağı füzyon yönteminin katman üretim mantığı, konvansiyonel yöntemlerle üretimi zor ya da imkansız olan parçaların hızlı ve çok daha az sayıda bileşenli olarak üretilmesine olanak sağlar [11].

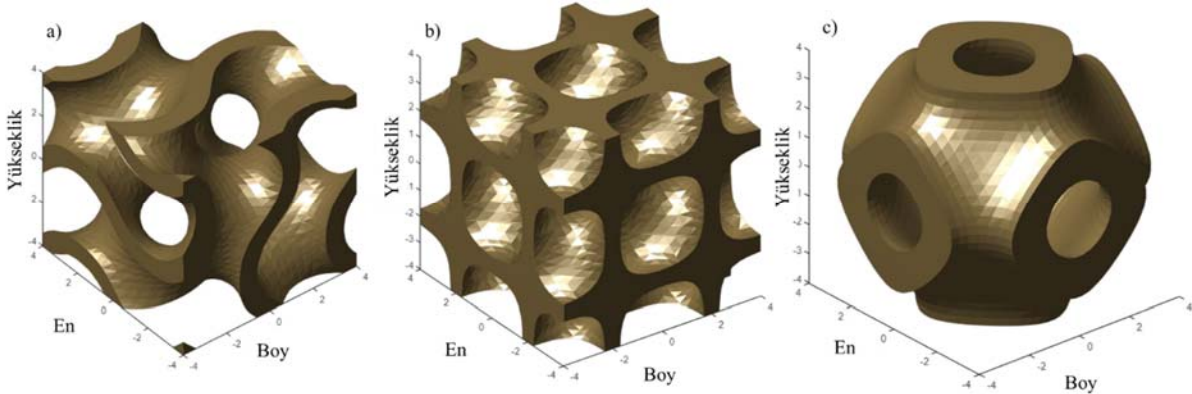
Kafes yapıların lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmesinin birçok avantajının olması yanında, üretilen parçanın gerçek parçadan boyutsal olarak sapması ve yüksek yüzey pürüzlülüğü göstermesi, bu teknolojinin en önemli dezavantajlarıdır. Literatürde, bahsi geçen boyutsal sapmanın ve yüksek yüzey pürüzlülüğünün farklı nedenleri olduğu belirtilmiştir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Toz tanecik büyüklüğündeki farklılıklar [12, 13].
- Toz tanecikleri ile daha önceden ergiyip katılmış katmanlar arasındaki ısı transferinden dolayı, tozların yüzeye yapışması [14]. Yüzeye yapışan tozlar, dikme boyutlarını arttırmakta ve boyutsal farklılıklara sebep olmaktadır [15].
- Metal ergiyik havuzunun, toz yatağını yeteri kadar ısıtaması ve ergiyik malzemenin yuvarlaklaşması (topaklanma), ve bu taneciklerin basım plakası üzerinde gelişigüzel dağılması [16, 17].

- Tam ergimemiş tozların, genişleyen ve toz yatağına doğru sarkan metal ergiyik havuzuna yapışması [18].
- Lazer toz yatağı füzyon yönteminde, eğer lazer tarama aralığı, lazer nokta boyutunu karşılamazsa, üretim sırasında lazerin tozları ergitmesi neticesinde oluşan ergiyik havuzu istenilen kesit alanından farklı olabilmektedir. Bu da istenilen geometriden boyutsal olarak sapmalara sebep olmaktadır [18].
- Lazer toz yatağı füzyon yönteminin doğası gereği oluşan merdiven etkisi (stair step effect) [18].

Literatürde, toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen kafes yapılarda meydana gelen boyutsal değişimler farklı çalışmalarda incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, bu boyutsal farkların, elde edilen geometrinin mekanik özelliklerini etkilediği belirtilmiştir [19]. Tarama stratejilerinin ve proses parametrelerinin de (lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi vb.) lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen gözenekli yapıların mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu literatürde belirtilmiştir [20]. Boyutsal farkların, kafes yapılarıdaki dikmelerin üretim yönüne göre konumuna bağlı olarak değiştiği, özellikle üretim yönüne göre aşağı bakan yüzeylerde bu boyutsal farkların daha fazla olduğu literatürde belirtilmiştir [21-23].

Literatür incelendiğinde farklı kafes yapılarının farklı üretim yöntemleri ile üretilmeleri neticesinde elde edilen boyutsal farklılıklar çalışılmış olmasına rağmen, kafes yapı tipi, inşa yönü ve hacim oranının boyutsal farklılıklar / sapmalar ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde ne derece etkili olduğu konusunda herhangi bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu eksikliği gidermek amacıyla, bu çalışmada Taguchi deney tasarım yöntemi yardımıyla üç farklı TPMS kafes yapısı (gyroid, elmas, primitif), üç farklı inşa yönü (45, 60 ve 90°) ve üç farklı hacim oranı (0,2, 0,3 ve 0,4) kullanılarak 9 farklı numune tasarlanmış ve lazer toz yatağı füzyon yöntemiyle üretilmiştir. Literatürde farklı TPMS ve dikme tabanlı kafes yapılar mevcut iken, bu çalışmada özellikle gyroid, elmas ve primitif kafes yapılarının (Şekil 1) kullanılmasının nedeni, bu üç TPMS yapının, dikme tabanlı yapılara göre daha yüksek yüzey-hacim oranı ve daha yüksek sertlik gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda daha çok tercih edilmesidir [24]. Genel olarak TPMS yapıların, özelde ise gyroid, elmas ve primitif kafes yapıların yüzeylerinin eğimli olması, bu yapıların, lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmesi durumunda, her bir katmanın bir sonraki katmanı desteklemesinden dolayı, çoğu zaman ilave bir destek yapıya gerek kalmadan üretilmelerine olanak verir [5]. Bu yapıların yükleme durumunda farklı mekanik davranış göstermeleri de mevcut çalışmada kullanılmalarının bir diğer sebebidir. Primitif yapılar aksenal yükleme durumunda uzama baskın davranış sergilerken, gyroid ve elmas kafes yapılar büküm baskın



Şekil 1. Çalışmada kullanılan TPMS birim kafes yapılar: a) gyroid, b) elmas, c) primitif (TPMS unit cell structures used in the study: a) gyroid, b) diamond, c) primitive).

davranış göstermektedir. Dolayısıyla, literatürde primitif kafes yapılar daha çok yüklemeye yönünde ve yüksek dayanım gerektiren yapılarda tercih edilirken, gyroid ve elmas yapılar daha çok plastik deformasyondan önce yüksek gerinim istenen yapılarda tercih edilmektedir [25]. Her bir numune için dört adet, toplamda 36 adet numune üretilmiş ve toz serme bıçağının bulunduğu yön +x yönü ve inşa yönü +z yönü kabul edilerek, +x, -x, +y, -y, +z ve -z yönlerinde meydana gelen boyutsal farklılıklar / sapmalar, ortalama yüzey pürüzlülükleri ve duvar kalınlık değişimleri ölçülmüş ve değişkenlerin analizi (Analysis of Variance, ANOVA) metodu kullanılarak hangi parametrenin bu farklar üzerinde ne kadar etkili olduğu hesaplanmıştır.

2. Malzeme ve Metot (Material and Method)

2.1. Taguchi Metodu Kullanılarak Hazırlanan Deney Tasarımı (Experimental Design Based on Taguchi Method)

Herhangi bir deney tasarımında birden fazla faktörün birden fazla seviyede kullanılması istendiği durumlarda, yapılacak deney sayısını azaltmak için Taguchi metodundaki ortogonal dizi tabloları kullanılabilir ve faktörler ve seviyeleri arasındaki en iyi kombinasyon hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada üç faktör ve her bir faktör için üç seviye öngörülmüştür. Tablo 1’de L₉ Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulmuş deney seti gösterilmiştir.

Her bir deney için performans kriteri olarak toplam 6 yönde meydana gelen boyutsal sapmalar ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Taguchi metodunda, deneysel sonuç ile istenilen sonuç arasındaki farkı hesaplamak için kayıp fonksiyonu ve sinyal-gürültü oranı (S/N ratio) kullanılmaktadır. Taguchi yönteminde performans kriterinin durumuna göre “en düşük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” şeklinde üç farklı sinyal-gürültü oranı kullanılabilir. Daha düşük bir boyutsal sapma ve yüzey pürüzlülüğü daha iyi bir performans demek olduğu için, bu çalışmada “en düşük en iyi” sinyal-gürültü oranı seçilmiştir. İlgili oran Eş. 1 yardımıyla bulunabilmektedir.

$$\eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Tablo 1. L₉ Taguchi ortogonal dizisine göre oluşturulmuş deney seti (Design of experiment based on L₉ Taguchi orthogonal array)

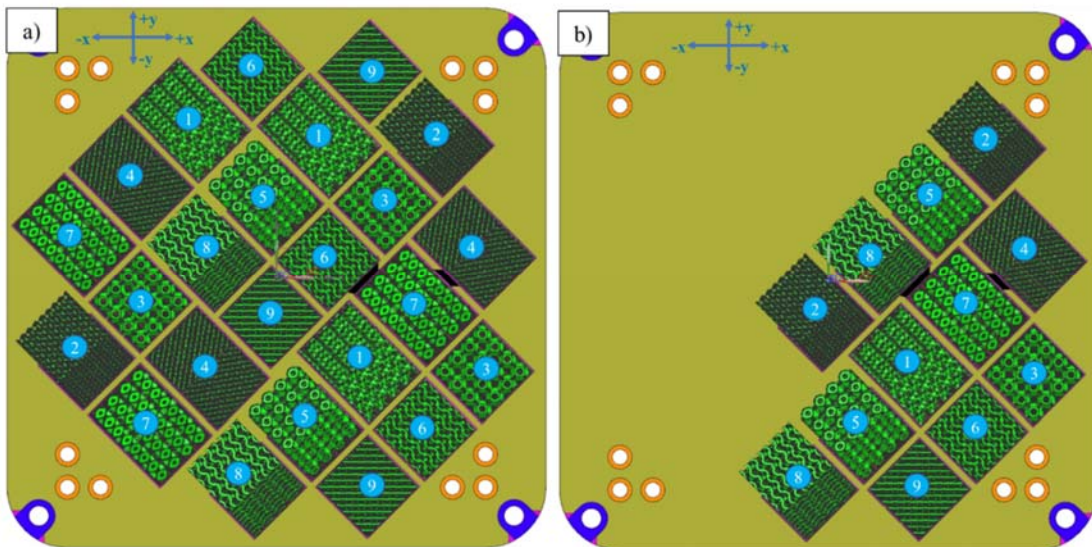
Numune No	Hacim oranı	İnşa yönü (°)	Kafes yapı tipi
1	0,2	45	Gyroid
2	0,2	60	Elmas
3	0,2	90	Primitif
4	0,3	45	Elmas
5	0,3	60	Primitif
6	0,3	90	Gyroid
7	0,4	45	Primitif
8	0,4	60	Gyroid
9	0,4	90	Elmas

Burada, η sinyal-gürültü oranını, y_i i numaralı deney sonucunda elde edilen performans çıktısını, n ise her bir deneyin tekrarlanma oranını göstermektedir (mevcut çalışmada 4’tür).

Deney sonucunda elde edilen performans çıktılarına bağlı olarak elde edilen sinyal-gürültü oranları, ANOVA yöntemi ile istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu sayede hangi faktörün performans çıktısı üzerinde ne kadar etkili olduğu hesaplanmıştır. İlgili hesaplamalar ve analizler için Minitab 19 programı kullanılmıştır.

2.2. Malzeme, Ekipman ve Proses (Material, Equipment and Process)

Toplamda 9 farklı numune Siemens NX yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Birim hücre boyutu 8 mm seçilmiş ve her yönde dört birim hücre kullanılmıştır. Dolayısıyla her bir numune 32x32x32 mm boyutlarında modellenmiştir. Modellenen numuneler Şekil 2’deki gibi üretim tablasına yerleştirilmiştir. Toz serim bıçağı, tozu sererken üretimi devam eden parça üzerinde mekanik bir yüklemeye ve bunun sonucunda da parçada deformasyona sebep olabilmektedir. Toz serim bıçağı ile parça arasındaki temas çizgisini ve dolayısıyla muhtemel deformasyonu azaltmak için Emmelmann vd. önerdiği gibi numuneler tablaya, toz serim bıçağı yönüne göre 45° açılı yerleştirilmiştir [26]. Numunelerin inşa yönüne göre Tablo 1’deki gibi açılı üretilebilmeleri için, altlarına bu açı değerlerini sağlayacak destek yapılar ilave edilmiştir. İnşa yönüne göre 45°’den yüksek açılara sahip yüzeyler herhangi bir destek yapısına ihtiyaç duymadan üretilebiliyorken, bu açı değerinin altındaki yüzeyler için destek yapısı gerekmektedir [27]. Deneylerin tekrarlanabilirliği açısından her



Şekil 2. İki farklı üretim tablasına (a ve b) yerleştirilen toplamda 36 numune. Numaralar ilgili numune numarasını göstermektedir. Toz serim bıçağı +x yönünden -x yönüne doğru hareket etmektedir (A total of 36 specimens in two different build platform (a and b). Numbers stand for specimen number. Recoater direction is from +x to -x).

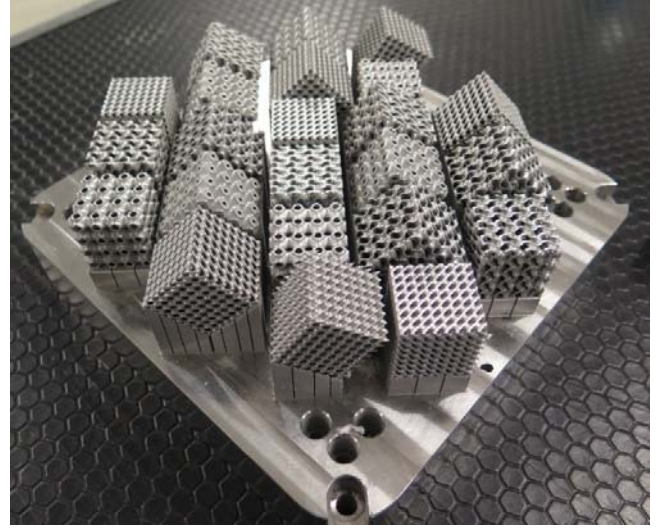
bir numuneden dört adet toplamda 36 adet numune üretilmesi hedeflenmiştir. Numuneler Concept Laser M2 makinesinde 10-45 µm tanecik büyüklüğünde CoCrMo toz malzeme kullanılarak, nitrojen gazı ortamında üretilmiştir. Üretim sırasında Concept Laser firmasının sağladığı standart proses parametreleri ve 50 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. CoCrMo toz malzemeye ait kimyasal kompozisyon Tablo 2’de gösterilmiştir. CoCr malzemeler ortopedide, farklı kırıkların tedavi edilmesi amacıyla kullanılan kemik plakalarının üretiminde [28], farklı diş hekimliği uygulamalarında [29] kullanılmaktadır.

Üretimden sonra basım plakası ve üzerindeki numuneler Solukon SFM-AT800 cihazına yerleştirilmiş ve cihazın dönme ve titreşim verme kabiliyetleri yardımıyla numunelerin içindeki ve dışındaki tozlar tahliye edilmiştir. Üretilen parçaların üretim tablasından ayrılması için GF Agiecharmill tel elektro erozyon tezgahı kullanılmıştır. İşlem sırasında 0,3 mm tel çapı ve 5 mm/dak kesme hızı kullanılmıştır. Üretim tablasından ayrılan numuneler teker teker ATOS ScanBox 4105 cihazında üç boyutlu taranmıştır. Tarama cihazının tolerans değerleri küçük boyuttaki parçalar için 15-20 µm, büyük boyuttaki parçalar için 30-40 µm’dir. Taranan numuneler ile ana geometri arasındaki farklı yönlerdeki boyutsal sapmaları ölçebilmek için GOM Inspect yazılımı kullanılmıştır. Tarama sonucu elde edilen geometriler, ana geometri ile GOM Inspect yazılımındaki “prealignment” opsiyonu kullanılarak üst üste yerleştirilmiş ve boyutsal sapmalar bu işlemde ölçülmüştür. Parçaların yüzey pürüzlülüğü (S_a) ölçümleri, Alicona InfiniteFocus G5 cihazında yapılmıştır. Cihazın kullanımı sırasında 10x büyütme oranı, 6 µm yanal çözünürlük ve 900 nm dikey çözünürlük değerleri kullanılmıştır. Her bir numunede 12 farklı bölgede yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve ilgili tablolara ortalama değerler yazılmıştır. Üretilen numunelerin duvar kalınlıklarının ölçümü ve metalografik incelemeler için Zeiss Merlin FE-SEM taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

3. Deneysel Sonuçları (Experimental Results)

3.1. Üretim Sonuçları (Production Results)

Üretilen numuneler Şekil 3’te gösterilmiştir. Şekil 3’ten görülebileceği gibi üretim sırasında herhangi bir problem ile karşılaşılmamıştır ve hem üretim hem de toz tahliye işlemi başarılı bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 3. Üretilen numunelerin çaprazdan görünümü (Perspective view of produced specimens)

3.2. Çarpılma Sonuçları (Distortion Results)

Üretim sonucunda bir numune için her bir yüzeyden elde edilen çarpılma görüntüleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Tablo 3’te ise her bir deney numunesi için altı farklı yönde ölçülen azami çarpılmalar gösterilmiştir. Her bir deney numunesi için dörder adet üretim gerçekleştirildiği için, tabloda aynı numuneye ait dört üretimdeki çarpılmaların ortalamaları yazılmıştır. Bu çarpılma miktarları kafes yapının genel boyutunda değil, farklı yüzeylerde lokal bazda görülen en yüksek çarpılmayı ifade etmektedir.

x ve y yönlerindeki çarpılmalar birbirine yakın çıkmışken, z yönündeki çarpılmaların daha yüksek olduğu Tablo 4’ten anlaşılmaktadır. Gülcan ve Günaydın’ın yaptıkları çalışmada belirttikleri gibi, eklemeli imalat ısı bir proses olduğu için, üretilecek parçada ince cidarlı yapılar var ise, z yüksekliği boyunca meydana gelen ısı gerilmeler neticesinde, bu ince cidarlı yapılar ısı dağılımı noktasında yetersiz kalmakta ve sonuçta yüksek deformasyona uğramaktadır [30]. Bu çalışmada kullanılan kafes yapılar da ince cidarlara sahip olduğu için, z yüksekliği boyunca benzer bir deformasyona maruz kalmıştır.

Tablo 2. CoCrMo toz malzemesinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of CoCrMo powder material)

Element	Co	Cr	Mo	C	Ni	Fe	Mn, Si	Diğerleri
Ağırlıkça %	Denge	27,0-30,0	5,0-7,0	Azami 0,35	Azami 0,50	Azami 0,75	Azami 1,0	Azami 0,58

Tablo 3. Numunelere ait altı yönde ölçülen azami çarpılmalar (Maximum distortions in six directions for specimens)

Numune No	Azami Çarpılmalar ($\times 10^{-1}$ mm)					
	+x yönü	-x yönü	+y yönü	-y yönü	+z yönü	-z yönü
1	3,596 ± 0,246	3,633 ± 0,284	3,596 ± 0,246	3,633 ± 0,284	3,656 ± 0,314	3,599 ± 0,251
2	3,027 ± 0,201	3,219 ± 0,223	3,027 ± 0,201	3,219 ± 0,223	3,731 ± 0,342	3,737 ± 0,355
3	4,139 ± 0,411	4,134 ± 0,402	4,134 ± 0,402	4,139 ± 0,411	5,836 ± 0,534	4,195 ± 0,442
4	3,297 ± 0,282	3,004 ± 0,195	3,297 ± 0,282	3,004 ± 0,195	3,268 ± 0,274	3,124 ± 0,215
5	4,055 ± 0,386	3,752 ± 0,342	4,055 ± 0,386	3,752 ± 0,342	4,831 ± 0,522	5,102 ± 0,568
6	3,753 ± 0,338	3,673 ± 0,322	3,753 ± 0,338	3,610 ± 0,327	5,150 ± 0,582	4,943 ± 0,534
7	3,953 ± 0,389	3,924 ± 0,392	3,953 ± 0,389	3,924 ± 0,392	3,984 ± 0,376	4,102 ± 0,404
8	3,581 ± 0,264	3,619 ± 0,278	3,581 ± 0,264	3,619 ± 0,278	4,470 ± 0,428	4,585 ± 0,488
9	2,888 ± 0,164	3,144 ± 0,245	3,144 ± 0,245	3,071 ± 0,193	3,971 ± 0,388	4,338 ± 0,502

Üç farklı kafes yapısı tipine ait taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5'te ve bütün numunelere ait ölçülen duvar kalınlıkları Tablo 4'te gösterilmiştir. Leary'nin belirttiği gibi, özellikle inşa yönüne göre aşağı bakan yüzeylerde, yüksek lokal sıcaklıklar ve yüzeyin, kendi altında bulunan, lazer taramasına ve dolayısıyla ergimeye maruz kalmayan toz tabakası ile direk teması neticesinde, yarı ergimiş toz taneciklerinin yapışması görülmektedir. Bu da özellikle aşağı bakan yüzeylerde yüksek yüzey pürüzlülüğü ve çarpılma sorunlarına yol açmaktadır [31]. Şekil 5'te de benzer şekilde, ergimemiş tozların yüzeye yapıştığı görülmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi bu toz taneciklerinin yapışması, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal farklılıkların en önemli sebeplerinden bir tanesidir [12, 18, 19, 21-23]. Yine Şekil 5'ten görüleceği gibi, üretim sırasında ergiyik havuzunun toz yatağına doğru sarkması sonucunda da dairesel olarak çıkması gereken bölgelerin oval çıktığı gözlemlenmiştir.

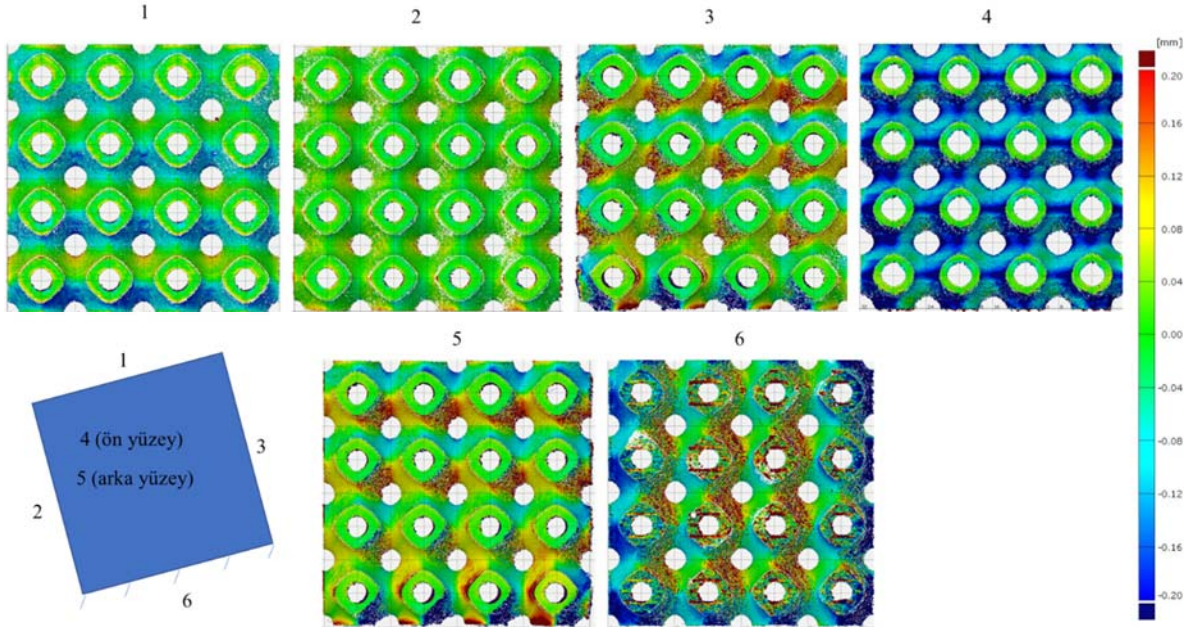
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları (Surface Roughness Results)

Üretim sonucunda bir numune seti için her bir yüzeyden elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Alicona tarama) görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen tarama görüntüleri yüzeydeki dalgalanmaları ihtiva etmektedir. Bu görüntülerdeki çukurların derinlikleri ve tümseklerin yükseklikleri Alicona cihazı tarafından otomatik ölçülmekte ve elde edilen değerlerin ortalaması, cihaz tarafından ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak verilmektedir. Yüzey

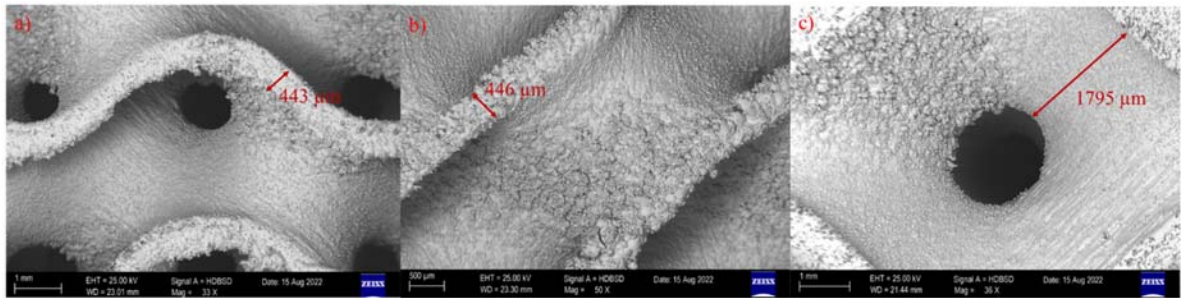
pürüzlülük değerleri karşılaştırması yapmak için, sadece yan yüzeylerdeki değerler ölçülmüş ve Tablo 5'te verilmiştir. Destek yüzeylerinde, destek parçalarının sökülmesi sonrasında arta kalan parçaların varlığı, bu bölgeden alınan yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını gerçekçi kılmamaktadır. Diğer taraftan üst yüzeyler, her bir numunede inşa yönüne göre aynı açıda olmadığı için bu bölgeden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin karşılaştırılması da gerçekçi yansıtmayacaktır. Bundan dolayı yüzey pürüzlülüğü karşılaştırmaları sadece numunelerin yan yüzeylerindeki değerler kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 4. Numunelere ait duvar kalınlık ölçümleri (Wall thickness measurements for specimens)

Numune No	Tasarlanan duvar kalınlığı (μm)	Ölçülen duvar kalınlığı (μm)	Fark
1	553	443 \pm 7	%19,9
2	357	172 \pm 4	%56,9
3	896	269 \pm 6	%69,9
4	550	446 \pm 9	%18,9
5	1413	394 \pm 8	%72,1
6	842	599 \pm 10	%28,9
7	1981	1795 \pm 18	%9,4
8	1133	750 \pm 12	%33,8
9	734	938 \pm 13	%27,8



Şekil 4. 5 numaralı deney numunesi için altı farklı yüzeydeki çarpılmalar (Distortions in six different surfaces for specimen 5)



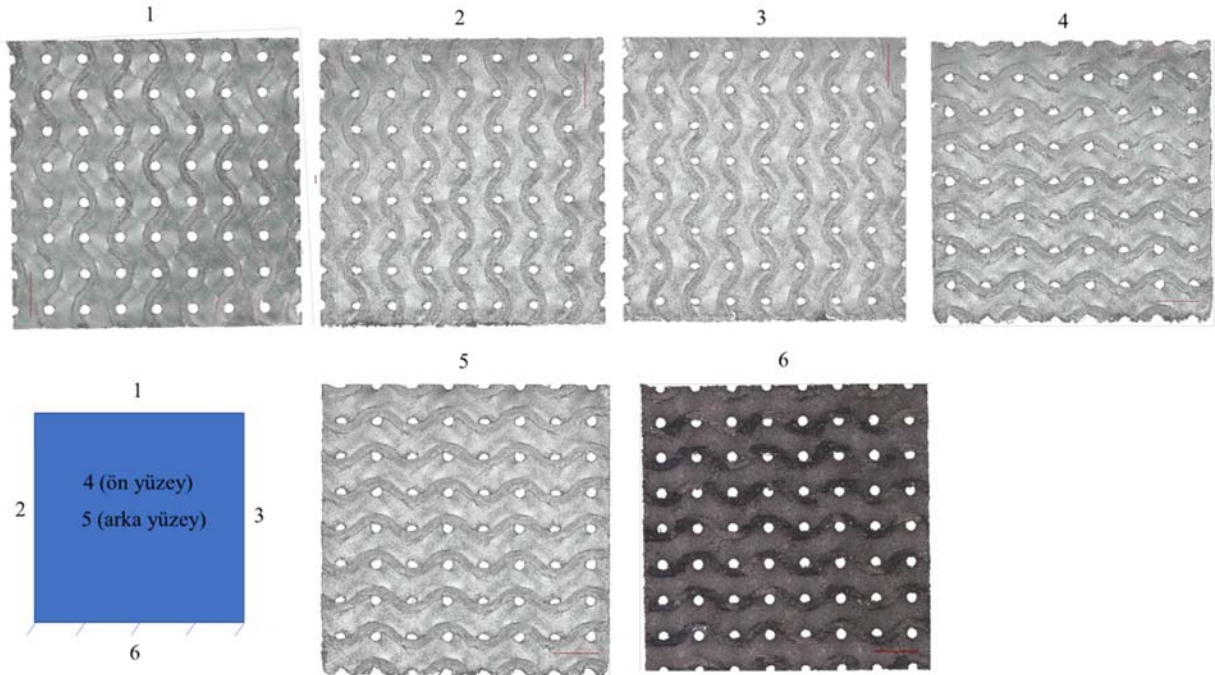
Şekil 5. 1 (a), 4 (b) ve 7 (c) numaralı deney numunelerine ait taramaları elektron mikroskop görüntüleri (Scanning electron microscope images for specimens 1 (a), 4 (b) and 7 (c))

4. Tartışmalar (Discussions)

4.1. Çarpılmalar İçin ANOVA Analizi (ANOVA Analysis for Distortions)

Minitab programı kullanılarak yapılan ANOVA analizi sonucunda 6 farklı yönde görülen çarpılmalara ait etki grafikleri Şekil 7-Şekil 9 arasında gösterilmiştir. Bütün yönlerde elmas kafes yapısı en düşük çarpılma gösterirken, primitif kafes yapısı en yüksek çarpılma göstermiştir. Bunun sebebi, aynı birim hücre boyutlarında ve hacim oranlarında, elmas kafes yapısının en yüksek, primitif kafes yapısının ise en düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Yoğunluğun artması ile birlikte, üretim sırasında ısı dağılımı daha düzgün olmakta ve nihayetinde parçada daha az çarpılma meydana gelmektedir [32]. Hacim oranı ve inşa yönü ile çarpılma arasında her zaman doğrusal bir ilişki görülmemesine rağmen, genel olarak inşa yönü 45°'den 90°'ye doğru çıktıkça, çarpılmaların azaldığı görülmüştür. Dallago

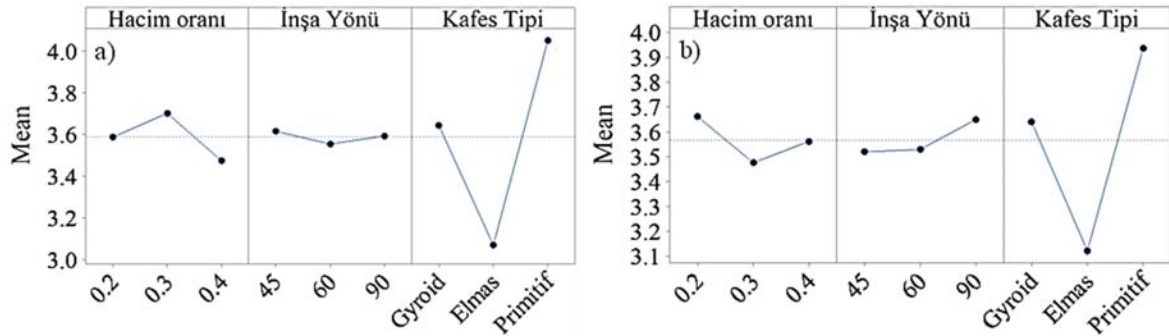
vd. de belirttiği gibi inşa yönü arttıkça, özellikle aşağı bakan yüzeylere yapışan ergimemiş toz miktarı azalmakta ve bu da çarpılmaların daha az olmasına yol açmaktadır [21]. TPMS kafes yapılar üç boyutlu karmaşık geometrilere sahip olduğu için, yapının bir duvarı inşa yönüne paralel iken, diğer bir duvarı inşa yönüne dik ya da belli bir açıda olabilmektedir [33]. İnşa yönü değiştikçe, hem duvarların inşa yönü ile yaptığı açı değişmekte, dolayısıyla üretim sırasında farklı ısı kalıntı gerilmeler oluşmakta [34], hem de farklı merdiven etkileri görünmektedir [35]. Bu iki etki farklı inşa yönlerinde ve farklı yüzeylerde (+x, -x, +y, -y, +z ve -z yönleri) farklı çarpılmalara sebebiyet vermektedir. Ayrıca, bu çalışmada, tam bir deney tasarımından ziyade, en iyi deney sonuçlarını (çarpılma, yüzey pürüzlülüğü ve duvar kalınlığı) verecek en optimum parametre seti (hacim oranı, inşa yönü ve kafes tipi) bulunması amacıyla daha az deney sayısı ihtiva eden Taguchi deney tasarımı kullanıldığı için, parametre setleri ile deney sonuçları arasında her zaman ilişki kurmak mümkün olamamaktadır.



Şekil 6. 6 numaralı deney numunesi için Alicona taramaları (Alicona scans for specimen 6)

Tablo 5. Numunelerin yanal yüzeylerinden ölçülen azami yüzey pürüzlülükleri (Maximum surface roughnesses in side walls of specimens)

Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Azami Yüzey	22,56 ±	12,32 ±	15,57 ±	27,50 ±	24,58 ±	18,68 ±	17,71 ±	21,38 ±	17,70 ±
Pürüzlülüğü (µm)	0,16	0,10	0,12	0,26	0,22	0,19	0,18	0,20	0,18



Şekil 7. +x (a) ve -x (b) yönündeki çarpılmalara ait etki grafiği (Mean effect plot for distortions along +x (a) and -x (b) directions)

Her bir yöndeki en iyi ve en kötü parametre seti incelendiğinde: +x yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, yani çarpılmaların en asgari değeri, elmas kafes yapısı, 0,4 hacim oranı ve 60° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir. -x yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, elmas kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir. +y yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, elmas kafes yapısı, 0,4 hacim oranı ve 60° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir. -y yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, elmas kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir.

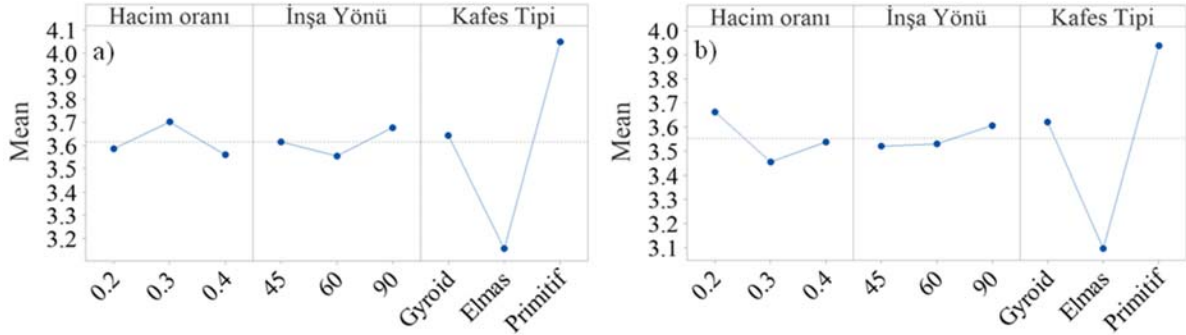
+z yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, elmas kafes yapısı, 0,4 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir. -z yönündeki çarpılmalar için, en optimum değer, elmas kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 45° inşa yönü olarak belirlenmiştir. En kötü değer ise primitif kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 90° inşa yönü olarak belirlenmiştir. Hacim oranı, inşa yönü ve kafes tipinin çarpılmalar üzerindeki göreceli etkisi, ANOVA yöntemi ile incelenmiş ve her bir yöndeki ilgili veriler Tablo 6'da

gösterilmiştir. Yanal yüzeylerde (+x, -x, +y ve -y yönleri) çarpılmalar üzerinde etkili faktör kafes tipi, en az etkili faktör ise inşa yönü olarak çıkmıştır. Kafes tipi, çarpılmalar üzerinde, +x yönünde %92,24, -x yönünde %91,19, +y yönünde %94,37 ve -y yönünde ise %91,55 etkiye sahiptir. İnşa yönü ise +x yönünde %0,36, -x yönünde %2,81, +y yönünde %1,78 ve -y yönünde ise %1,14 etkiye sahiptir. Hacim oranı ise yanal yüzeylerdeki çarpılmalar üzerinde kafes tipinden sonra ikinci en etkili faktördür.

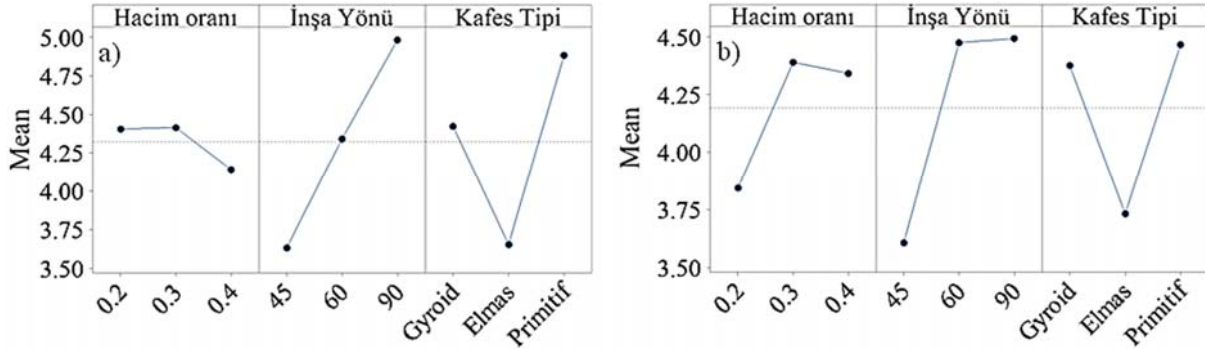
+z ve -z yönündeki çarpılmalar için ANOVA sonuçları incelendiğinde, bu yönlerdeki etkili faktörün inşa yönü, en az etkili faktörün ise hacim oranı olduğu görülmüştür. İnşa yönü +z yönünde %50,64, -z yönünde ise %46,77 etkiye sahip iken, hacim oranı +z yönünde %2,71, -z yönünde %16,74 etkiye sahiptir. Kafes tipi ise inşa yönünden sonra en etkili faktördür ve +z yönünde %42,71, -z yönünde %29,28 etkiye sahiptir.

4.2. Yüzey Pürüzlülüğü İçin ANOVA Analizi (ANOVA Analysis for Surface Roughness)

ANOVA analizi sonucunda yanal yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait etki grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Elmas kafes yapısı en düşük yüzey pürüzlülüğü gösterirken, gyroid kafes yapısı en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri göstermiştir. Farklı kafes yapılarının üretiminde çıkan farklı yüzey pürüzlülükleri, bu yapılara



Şekil 8. +y (a) ve -y (b) yönündeki çarpılmalar için etki grafiği (Mean effect plot for distortions along +y (a) and -y (b) directions)

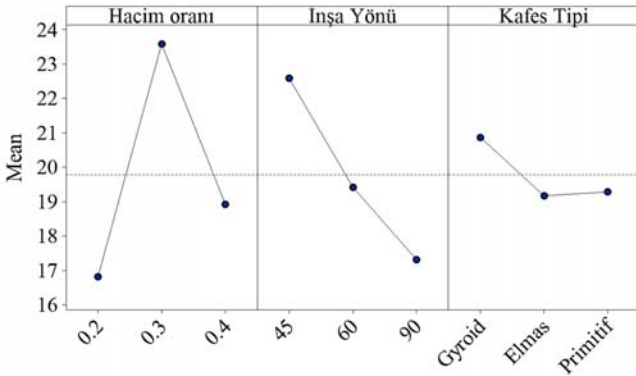


Şekil 9. +z (a) ve -z (b) yönündeki çarpılmalar için etki grafiği (Mean effect plot for distortions along +z (a) and -z (b) directions)

Tablo 6. Altı yöndeki çarpılmalar için ANOVA sonuçları (ANOVA results for distortions in six directions)

Kaynak	+x Yönündeki Etki	-x Yönündeki Etki	+y Yönündeki Etki	-y Yönündeki Etki	+z Yönündeki Etki	-z Yönündeki Etki
Hacim oranı	%4,95	%4,63	%2,72	%5,60	%2,71	%16,74
İnşa Yönü	%0,36	%2,81	%1,78	%1,14	%50,64	%46,77
Kafes Tipi	%92,24	%91,19	%94,37	%91,55	%42,71	%29,28
Hata	%2,45	%1,37	%1,13	%1,71	%3,94	%7,21
Toplam	%100,00	%100,00	%100,00	%100,00	%100,00	%100,00

ait farklı yüzey alanlarından kaynaklanmaktadır. İlgili kafes yapısının yüzey alanı arttıkça, ilgili kesitteki taranan ve soğuyup katlaşılan katmanın toz yatağı ile olan etkileşimi artmakta ve bu da daha fazla ergimemiş tozun yüzeye yapışmasına sebep olmaktadır. Bu durum hem yüzey pürüzlülüğünü arttırmakta hem de boyutsal sapmaları değiştirmektedir [36]. İnşa yönü 45°'den 90°'ye doğru çıktıkça, yanal yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, inşa yönü arttıkça, birbirini takip eden katmanlar arasında oluşan merdiven etkisinin azalması ve daha homojen bir ergiyik havuzunun oluşumudur [37]. Ayrıca inşa yönü arttıkça, toz yatağına doğru daha düzgün bir enerji akışı olmakta ve bu da daha az ergimemiş tozun kafes yapısının duvarına yapışmasına ve daha az yüzey pürüzlülüğüne yok açmaktadır [38]. Hacim oranı ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığı Şekil 9'dan görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünü en aza indirebilmek için kullanılması gereken en iyi parametre seti, elmas kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 90° inşa yönüdür. En kötü değer ise gyroid kafes yapısı, 0,3 hacim oranı ve 45° inşa yönüdür.

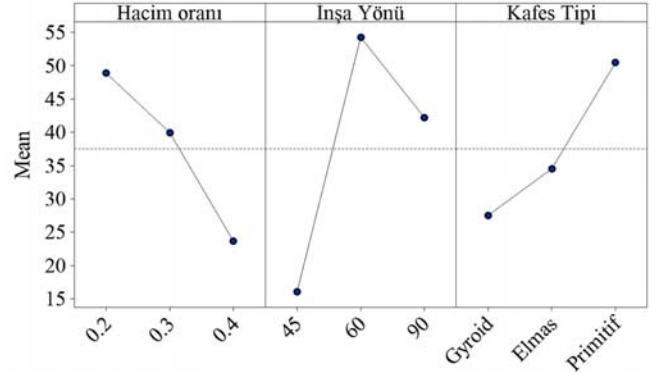


Şekil 10. Yan yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğüne ait etki grafiği (Mean effect plot for surface roughness in side walls)

Hacim oranı, inşa yönü ve kafes tipinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki göreceli etkisi, ANOVA yöntemi ile incelenmiş ve ilgili veriler Tablo 7'de gösterilmiştir. Yanal yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktör hacim oranı, en az etkili faktör ise kafes tipi olarak çıkmıştır. Hacim oranı, yüzey pürüzlülüğü üzerinde, %40,87 etkiye sahipken, inşa yönü %24,00 etkiye sahiptir. Kafes tipi ise göreceli olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok az etkiye sahiptir (%3,08). Tablo 7 incelendiğinde elde edilen sonuçlarda ciddi hata payının olduğu da görülmektedir. Bu hata payı üzerinde inşa yönüne göre özellikle aşağı bakan yüzeylerde görülen yüksek yüzey pürüzlülüğünün etkili olduğu düşünülmektedir.

4.3. Duvar Kalınlık Değişimi İçin ANOVA Analizi (ANOVA Analysis for Wall Thickness Variation)

Tasarlanan ve üretilen parçaların duvar kalınlıklarının ölçümü neticesinde elde edilen farklar ANOVA yöntemi ile incelenmiş ve elde edilen etki grafiği ve değerler sırasıyla Şekil 11 ve Tablo 8'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Duvar kalınlığındaki değişime ait etki grafiği (Mean effect plot for wall thickness variation)

Şekil 11'den görülebileceği gibi, hacim oranı arttıkça tasarlanan ve üretilen parçalar arasındaki duvar kalınlık farkları azalmaktadır [26]. Aynı birim hücre boyutlarında, hacim oranı arttıkça tasarlanan duvar kalınlıkları artmakta, bu da üretim sırasında ısı dağılımını olumlu etkilemekte ve tasarlanan ve üretilen duvar kalınlıkları arasındaki farkın az çıkmasına sebep olmaktadır [39]. Genel olarak, lazer toz yatağı füzyonu ile yapılan TPMS üretimlerinde, üretimden sonra duvar kalınlığı artışının olduğu ve bunun sebebinin ergiyik havuzunun toz yatağına doğru sarkması ve etraftaki tozların, yüzey geriliminden dolayı ergiyik havuzuna yapışması olduğu literatürde belirtilmiştir [36]. Hacim oranı azaldıkça, daha önceden ergiyip katlanmış katmanlar ile toz yatağı arasındaki etkileşim artmakta, ve bu da, ergiyen katmanlar katlaşıırken, daha fazla tozun, tam ergimeden, katlaşılan katmanlara yapışmasına sebep olmaktadır [40]. Yan vd. farklı hacim oranlarında gyroid kafes yapılarını inceledikleri çalışmalarında, üretim sonrası duvar kalınlığındaki artışı duvarların inşa yönüne göre aşağı bakan yüzeylerine yapışan tam ergimemiş tozlara bağlamışlardır. Fakat hacim oranı ile duvar kalınlığı değişimi arasında doğrusal bir bağ bulamamışlardır [15]. Sokollu vd. ise yaptıkları deneysel çalışmada elmas kafes yapının en düşük, gyroid kafes yapının ise en yüksek duvar kalınlığı değişimi gösterdiğini belirtmiş ve bunu yüzeylere yapışan farklı miktardaki tam ergimemiş tozlara bağlamışlardır [41]. Ayrıca, hacim oranı, inşa yönü ve kafes tipi değişince her bir katmanda lazerin tarayacağı alan değişmekte ve farklı ısı kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Literatürde, bu ısı kalıntı gerilmeler neticesinde parçalarda farklı miktarlarda hatalar oluşabileceği (yüzey ya da yüzey altı gözenekler, yüzeyden dışarıya doğru mantar şeklinde çıkıntılar vb.) ve bu hataların parçadaki kalınlık değişimini etkileyebileceği belirtilmiştir [42]. Tasarlanan ve üretilen geometrilere en düşük kalınlık farkını elde edebilmek için

Tablo 7. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları (ANOVA results for surface roughness)

Kaynak	Hacim oranı	İnşa Yönü	Kafes Tipi	Hata	Toplam
Etki	%40,87	%24,00	%3,08	%32,05	%100,00

Tablo 8. Duvar kalınlığındaki değişim için ANOVA sonuçları (ANOVA results for wall thickness variation)

Kaynak	Hacim oranı	İnşa Yönü	Kafes Tipi	Hata	Toplam
Etki	%23,11	%53,83	%19,50	%3,57	%100,00

kullanılması gereken optimum değer gyroid kafes yapısı, 0,4 hacim oranı ve 45° inşa yönüdür. En kötü değer yani tasarlanan ve üretilen duvar kalınlıklarının en kötü çıkacağı değer ise primitif kafes yapısı, 0,2 hacim oranı ve 60° inşa yönüdür.

Tablo 8 incelendiğinde ise, duvar kalınlık değişimi üzerinde en etkili faktörün inşa yönü olduğu, hacim oranı ve kafes tipinin ise hemen hemen benzer etkiye sahip olduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada Taguchi deney tasarımı kullanılarak elde edilen elmas, gyroid ve primitif kafes yapıların toz yatağı füzyon yöntemi ile CoCrMo malzeden üretilmeleri neticesinde meydana gelen çarpılmalar, yüzey pürüzlülükleri ve duvar kalınlık değişimleri üzerinde kafes yapısı çeşidi, hacim oranı ve inşa yönünün etkisi deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Bu sayede çarpılmayı, yüzey pürüzlülüğünü ve duvar kalınlık değişimini en aza indirecek parametre seti bulunması hedeflenmiştir. Elde edilen veriler neticesinde aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Elmas kafes yapısı, diğer kafes yapılarına göre, daha düşük çarpılma ve yüzey pürüzlülüğü göstermiştir. Çarpılma ve yüzey pürüzlülüğü açısından primitif ve gyroid kafes yapıları sırasıyla en kötü performansı göstermiştir.
- Hacim oranı ile çarpılma ve yüzey pürüzlülüğü arasında her zaman doğrusal bir ilişki olmamasına rağmen, inşa yönü arttıkça çarpılma ve yüzey pürüzlülüğü azalmıştır.
- Yanal yüzeyler incelendiğinde, çarpılma üzerinde en etkili faktör kafes tipi, en az etkili faktör ise inşa yönü olarak çıkarken, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktör hacim oranı, en az etkili faktör ise kafes tipi olarak çıkmıştır.
- İnşa tablasına dik yöndeki (+z yönü) çarpılma incelendiğinde, en etkili faktörün inşa yönü, en az etkili faktörün ise hacim oranı olduğu görülmüştür.
- Duvar kalınlığındaki değişim üzerinde en etkili faktör inşa yönü olarak elde edilmiştir. Hacim oranı dolayısıyla tasarlanan duvar kalınlığı ile duvar kalınlık değişimi arasında doğrusal orantı elde edilmiştir. Hacim oranı arttıkça, üretilen ve tasarlanan duvar kalınlıkları arasındaki fark azalmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Yuan, L., Ding, S., Wen, C., Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review, *Bioactive Materials*, 4, 56-70, 2019.
2. Zhang, X. Z., Leary, M., Tang, H. P., Song, T., Qian, M., Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges, *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 22 (3), 75-99, 2018.
3. Yan, C., Hao, L., Yang, L., Hussein, A. Y., Young, P. G., Li, Z., Li, Y., Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting, *Huazhong University of Science and Technology Press, Wuhan, China*, 1-25, 2021.
4. Dallago, M., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., Benedetti, M., On the effect of geometrical imperfections and defects on the fatigue strength of cellular lattice structures additively manufactured via Selective Laser Melting, *International Journal of Fatigue*, 124, 348-360, 2019.
5. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M., SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges, *Materials and Design*, 183, 108-137, 2019.
6. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G. M., Kuntoğlu, M., Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges, *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1040-1063, 2022.
7. Helou, M., Kara, S., Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (3), 243-261, 2018.
8. Najmon, J. C., Raeisi, S., Tovar, A., Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Editör: Froes, F., Boyer, R., Elsevier Publishing, Amsterdam, Netherlands, 7-31, 2019.
9. Avila, J. D., Bose, S., Bandyopadhyay, A. Additive manufacturing of titanium and titanium alloys for biomedical applications, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Editör: Froes, F. H., Qian, M., Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Sawston, UK, 325-343, 2018.
10. Sefene, E. M. State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review, *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 250-274, 2022.
11. Flores, I., Kretschmar, N., Azman, A. H., Chekurov, S., Pedersen, D. B., Chaudhuri, A., Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion, *Additive Manufacturing*, 31, 100947, 2020.
12. Bartolomeu, F., Dourado, N., Pereira, F., Alves, N., Miranda, G., Silva, F. S., Additive manufactured porous biomaterials targeting orthopedic implants: A suitable combination of mechanical, physical and topological properties, *Materials Science & Engineering C*, 107, 110342, 2020.
13. Bartolomeu, F., Fonseca, J., Peixinho, N., Alves, N., Gasik, M., Silva, F. S., Miranda, G., Predicting the output dimensions, porosity and elastic modulus of additive manufactured biomaterial structures targeting orthopedic implants, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 99, 104-117, 2019.
14. Ran, Q., Yang, W., Hu, Y., Shen, X., Yu, Y., Xiang, Y., Cai, K., Osteogenesis of 3D printed porous Ti6Al4V implants with different pore sizes, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 84, 1-11, 2018.
15. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymond, D., Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting, *Materials & Design*, 55, 533-541, 2014.
16. Rashid, R. A. R., Mallavarapu, J., Palanisamy, S., Masood, S. H., A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures, *Materials Today: Proceedings*, 4, 8597-8604, 2017.
17. Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W., Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, 1025-1035, 2012.
18. Sing, S. L., Miao, Y., Wiria, F. E., Yeong, W. Y., Manufacturability and mechanical testing considerations of metallic scaffolds fabricated using selective laser melting: a review, *Biomedical Science and Engineering*, 2 (11), 18-24, 2016.
19. Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Pasini, D., Benedetti, M., Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices, *Procedia Structural Integrity*, 13, 161-167, 2018.
20. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using ti6Al4v alloy powder, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 127-143, 2018.
21. Dallago, M., Raghavendra, S., Luchin, V., Zappini, G., Pasini, D., Benedetti, M., Geometric assessment of lattice materials built via Selective Laser Melting, *Materials Today: Proceedings*, 7, 353-361, 2019.
22. Leary, M., Mazur, M., Mcmillan, M., Chirent, T., Sun, Y. Y., Qian, M., Easton, M. Brandt, M., Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures, *Materials and Design*, 98, 344-357, 2016.
23. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J., Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density, *Additive Manufacturing*, 16, 213-224, 2017.
24. Feng, J., Fu, J., Yao, X., He, Y., Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4 (2), 202, 2001.
25. Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., Hague, R. J. M., Insights

- into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing, *Polymer*, 152, 62-71, 2018.
26. Emmelmann, C., Herzog, D., Kranz, J., Design for laser additive manufacturing, *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, Editör: Brandt, M., Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Sawston, UK, 259-279, 2017.
 27. Alfaify, A., Saleh, M., Abdullah, F. M., Al-Ahmari, A. M., Design for additive manufacturing: a systematic review, *Sustainability*, 12, 7936, 2020.
 28. Aycan M.F., Investigation on manufacturability of bone plates used in humerus fractures by additive manufacturing method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2007-2016, 2019.
 29. Aygül E., Yalçınkaya S., Şahin Y., Characterization of Co-24,7Cr-5,4W-5 Mo-Si alloy used in dental applications Produce by additive manufacturing method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 571-580, 2022.
 30. Gülcan, O., Günaydın, K., Distortion and dimensional deviation of Inconel 718 auxetic structures produced by DMLM, *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1 (3), 563, 2021.
 31. Leary, M., Design of titanium implants for additive manufacturing, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Editör: Froes, F. H., Qian, M., Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Sawston, UK, 203-224, 2018.
 32. Zhang, L., Feih, S., Daynes, S., Chang, S., Wang, M. Y., Wei, J., Lu, W. F., Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading, *Additive Manufacturing*, 23, 505-515, 2018.
 33. Al-Ketan, O., Rowshan, R., Abu Al-Rub, R. K., Topology mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing*, 19, 167-183, 2018.
 34. Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Mahale, T., Properties of Ti-6Al-4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting, *Materials Science and Engineering: A*, 492 (1-2), 468-474, 2008.
 35. Weißmann, V., Drescher, P., Bader, R., Seitz, H., Hansmann, H., Laufer, N., Comparison of single Ti6Al4V struts made using selective laser melting and electron beam melting subject to part orientation, *Metals*, 7 (3), 91, 2017.
 36. Bobbert, F.S.L., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, S. M., Weinans, H., Zadpoor, A. A., Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties, *Acta Biomaterialia*, 53, 572-584, 2017.
 37. Yang, E., Leary, M., Lozanovski, B., Downing, D., Mazur, M., Sarker, A., Khorasani, A. M., Jones, A., Maconachie, T., Bateman, S., Easton, M., Qian, M., Choong, P., Brandt, M., Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study, *Materials & Design*, 184, 108165, 2019.
 38. Wang, N., Meenashisundaram, G. K., Chang, S., Fuh, J. Y. H., Dheen, S. T., Kumar, A. S., A comparative investigation on the mechanical properties and cytotoxicity of Cubic, Octet, and TPMS gyroid structures fabricated by selective laser melting of stainless steel 316L, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 129, 105151, 2022.
 39. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Raymont, D., Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38, 2012.
 40. Qu, S., Ding, J., Song, X., Achieving triply periodic minimal surface thin-walled structures by micro laser powder bed fusion process, *Micromachines*, 12, 705, 2021.
 41. Sokollu, B., Gulcan, O., Konukseven, E. I., Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting, *Additive Manufacturing*, 103199, 2022.
 42. Al-Ketan, O., Abu Al-Rub, R. K., Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices, *Advanced Engineering Materials*, 21 (10), 1900524, 2019.

