

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞRUDAN METAL LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE  
ÜRETİLEN LATİS YAPILARIN MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MUSTAFA ENES BULDUK**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞRUDAN METAL LAZER SİNTERLEME YÖNTEMİ İLE**  
**ÜRETİLEN LATİS YAPILARIN MİKROYAPI VE MEKANİK**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MUSTAFA ENES BULDUK**

**Doç.Dr. Alpay Tamer ERTÜRK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç.Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Dr.Öğr. Üyesi Gökhan ÖZER**  
**Jüri Üyesi, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniv.** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 05.06.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, geleceğin üretim metotlarından olan katmanlı imalatın verdiği tasarım özgürlüğünden faydalanılarak latis yapıların üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel bir araştırmayı içermektedir.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, kendisinden çok şey öğrendiğim değerli danışman hocam Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK'e teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Laboratuvar desteği sağlayan Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi Müdürü Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ ve ekibine, çalışmada desteklerini esirgemeyen Yük. Müh. Mert COŞKUN, Yük. Müh. Gürkan TARAKÇI, Endüstriyel Tasarımcı Cemal İrfan ÇALIŞKAN ve Müh. Uğur ERGİN'e sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Son olarak tez döneminde tanışıp evlendiğim manevi destekçim Walaa BULDUK'a, beni bugünlere getiren babam ALİ BULDUK ve annem Seher BULDUK'a, moral kaynaklarım Esmâ ve Ensar BULDUK'a canı yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2020

Mustafa Enes BULDUK

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ .....	1
1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2. GENEL BİLGİLER .....	17
2.1. Hücresel ve Gözenekli Yapılar .....	17
2.2. Latis Yapılar .....	18
2.3. Katmanlı İmalat .....	20
2.4. Katmanlı İmalat Yöntemleri.....	22
2.5. Tarayarak Işıkla Kürleme Tekniği ve Stereolitografi Cihazı .....	23
2.6. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği .....	23
2.7. Malzeme Püskürtme Tekniği .....	24
2.8. Saç Laminasyon Tekniği .....	24
2.9. Malzeme Ekstrüzyonu Tekniği .....	24
2.10. Yönlendirilmiş Enerji ile Yığıma Tekniği.....	24
2.11. Toz Yatağında Birleştirme Tekniği.....	25
2.12. DMLS .....	25
2.13. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımaları.....	27
3. MATERYAL VE METOT .....	33
3.1. Spektrometre Analizi.....	33
3.2. AlSi10Mg Tozu.....	34
3.3. Materialise Magics .....	37
3.4. EOS RP TOOLS.....	37
3.5. EOS PRINT .....	37
3.6. EOS M290.....	37
3.7. Kütle Ölçümü .....	38
3.8. SEM/EDS Analizi .....	39
3.9. Sertlik Testi .....	40
3.10. Basma Testi .....	40
4. DENEY NUMUNELERİ .....	43
4.1. Tarama Aralığı Değiştirilerek Üretilen Boşluklu Yapı .....	44
4.2. Double Pyramid Lattice with Cross Yapı .....	45
4.3. Double Pyramid Lattice with Lateral Yapı .....	47
4.4. Double Pyramid Lattice without The Lateral.....	48
4.5. Dimensional Lattice Infill Pattern Yapı .....	50
5. DENEYSEL BULGULAR .....	53
5.1. Kütle Ölçümleri ve Yoğunluk Hesaplamaları .....	53
5.2. SEM Görüntüleri .....	54

5.3. EDS Analizleri .....	59
5.4. Sertlik Testi Sonuçları .....	60
5.5. Basma Testi Sonuçları .....	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	66
KAYNAKLAR .....	68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	74
ÖZGEÇMİŞ .....	75



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Süngerimsi kemik yapılar ve latis yapılar a, b) süngersi kemik taramaları, c) latis yapı	3
Şekil 1.2.	Latis birim hücresi a) gyroid birim hücresi, b) diamond triply periodic minimal surface birim hücresi	4
Şekil 1.3.	Enerji yoğunluğu değiştirilerek üretilen latisler	6
Şekil 1.4.	Lazer tarama aralığı değiştirilerek oluşturdukları gözenekli yapının şematik diyagramı	7
Şekil 1.5.	Farklı tarama aralıkları ile üretilen yapıların SEM görüntüleri	8
Şekil 1.6.	Qiu ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları latis yapı a) birim hücresi b) kafes yapısı	9
Şekil 1.7.	375 W lazer gücü ve 7000 mm/s tarama hızı ile üretilen latisin SEM görüntüsü	9
Şekil 1.8.	Birim hücreler a) Octet truss birim hücresi, b) Tetrahedron birim hücresi için geliştirilmiştir	11
Şekil 1.9.	Bal peteği ve hibrit modelleri a) kare bal peteği, b) latis duvarlı kare bal peteği ve c) ince latis duvarlı kare bal peteği	12
Şekil 1.10.	Birim hücrelerin optik mikroskop görüntüleri a) latis duvarlı kare petek, b) ince latis duvarlı kare petek	12
Şekil 1.11.	Sing ve arkadaşlarının tasarladıkları latis yapı	14
Şekil 1.12.	Farklı birim hücre tipleri a) BCC ve b) BCCZ	15
Şekil 2.1.	Gözenekli metal yapılar a) köpük metal, b) bal peteği, c,d,e) sünger metaller	17
Şekil 2.2.	Dikme ve düğüm yapısı örneği	19
Şekil 2.3.	Geleneksel üretim yöntemleri ve eklemeli imalat	22
Şekil 2.4.	Yönlendirilmiş lazer enerjisi ile yığıma	25
Şekil 2.5.	DMLS sisteminin şematik diyagramı	26
Şekil 2.6.	Sinterleme fenomeninin farklı aşamaları	27
Şekil 3.1.	ARL™ 3460 optik emisyon spektrometresi	34
Şekil 3.2.	Toz SEM görüntüsü	35
Şekil 3.3.	EOS M290 makinesi	38
Şekil 3.4.	Hassas tartım cihazı	39
Şekil 3.5.	SEM/EDS cihazı	39
Şekil 3.6.	Shimadzu setlik cihazı	40
Şekil 3.7.	Gözenekli yapıların deformasyon bölgeleri	41
Şekil 3.8.	ALŞA 100kN test cihazı	42
Şekil 4.1.	Üretilen farklı tip gözenekli numuneler a) C1, b) D2, c) T1	43
Şekil 4.2.	T1 gözenekli yapının tasarımı	44
Şekil 4.3.	Double pyramid lattice with cross latis birim hücresi	45
Şekil 4.4.	C1 latis yapının birim hücresi	45
Şekil 4.5.	C2 latis yapının birim hücresi	46
Şekil 4.6.	C2 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler	46
Şekil 4.7.	Double pyramid lattice with lateral birim hücresi	47
Şekil 4.8.	L1 latis yapının birim hücresi	47

Şekil 4.9. L1 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler .....	48
Şekil 4.10. Double pyramid lattice without the lateral birim hücresi.....	48
Şekil 4.11. P1 latis yapının birim hücresi.....	49
Şekil 4.12. P1 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler .....	49
Şekil 4.13. 3-dimensional lattice infill pattern birim hücresi .....	50
Şekil 4.14. D1 latis yapının birim hücresi .....	50
Şekil 4.15. D2 latis yapının birim hücresi .....	51
Şekil 4.16. D2 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler .....	51
Şekil 5.1. Kumpas ile boyut ölçümü .....	53
Şekil 5.2. T1 numunesi SEM görüntüsü.....	54
Şekil 5.3. D1 numunesi SEM görüntüsü .....	55
Şekil 5.4. C1 numunesi SEM görüntüsü .....	56
Şekil 5.5. C2 numunesi SEM görüntüleri a) 27x yaklaşma, b-c) 40x yaklaşma.....	57
Şekil 5.6. L1 numunesi SEM görüntüsü a) birim hücre ölçüleri, b) birim hücre açıları.....	58
Şekil 5.7. P1 numunesi SEM görüntüsü.....	58
Şekil 5.8. D2 numunesinin SEM görüntüleri a) 27x yaklaşma, b) 40x yaklaşma.....	59
Şekil 5.9. EDS ile 2 boyutta alınan element dağılım haritası c) C2 numunesi, b) L1 numunesi, c) P1 numunesi, d) D1 numunesi .....	60
Şekil 5.10. T1 numunesi gerilme–gerinim grafiği.....	61
Şekil 5.11. C1 numunesi gerilme –gerinim grafiği .....	62
Şekil 5.12. D1 numunesi gerilme–gerinim grafiği .....	62
Şekil 5.13. C2, D2, P1, L1 numunelerinin gerilme–gerinim grafiği.....	63

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Alüminyum elementinin temel fiziksel özellikleri.....	28
Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi .....	30
Tablo 3.1. Kullanılan cihazlar ve yazılımlar .....	33
Tablo 3.2. Toz partikül analizi.....	35
Tablo 3.3. Toz Yoğunluğu.....	36
Tablo 3.4. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi .....	36
Tablo 3.5. AlSi10Mg yarıçap yoğunluğu .....	36
Tablo 3.6. EOS M290 teknik özellikleri .....	38
Tablo 4.1. DMLS M290 cihazı AlSi10Mg için üretim parametresi.....	44
Tablo 4.2. Latis yapıların tasarım parametreleri.....	52
Tablo 4.3. Latislerin tasarım verilerine göre hacim, ağırlık, yoğunluk ve poroziteleri .....	52
Tablo 5.1. Üretim sonrası kütle ve yoğunluk değerleri .....	54
Tablo 5.2. Numunelerin oksijen oranları.....	60
Tablo 5.3. Üretim sonrası Vickers sertlik değerleri .....	60
Tablo 5.4. Numunelerin nispi yoğunlukları, akma mukavemetleri, elastisite modülleri ve Gibson-Ashby modeline göre C1,C2 sabitleri.....	64
Tablo 5.5. Latis yapıların farklı birim şekli değiştirmede yarı statik basma testi görüntüleri .....	64



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E*	: Latis yapı elastik modülü, (N/mm <sup>2</sup> )
E0	: Ana malzemenin elastik modülü, (N/mm <sup>2</sup> )
M	: Maxwell denge kriteri
n	: Düğüm sayısı
s	: Dikme sayısı
$\rho^*$	: Nispi yoğunluk
$\rho_0$	: Ana malzemenin yoğunluğu, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	: Gözenekli malzemenin yoğunluğu, (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_0$	: Latisin üretildiği malzemenin akma dayanımı, (N/mm <sup>3</sup> )
$\sigma_L$	: Latisin akma dayanımı, (N/mm <sup>3</sup> )

### Kısaltmalar

BCC	: Body Centered Cubic (Hacim Merkezli Kübik)
BCCZ	: Body Centered Cubic With Vertical Strut (Z - Hacim Merkezli Kübik)
CAD	: Computer-Aided Drawing (Bilgisayar Destekli Çizim)
CLI	: Common Layer Interface (Ortak Katman Arayüzü)
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering (Doğrudan Metal Lazer Sinterleme)
EBM	: Elektron Işını Eritme
EDS	: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
FCC	: Face-Centered Cubic (Yüzey Merkezli Kübik)
Kİ	: Katmanlı İmalat
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SLI	: Slice Layer Interface (Dilim Katmanı Arayüzü)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
STL	: Standard Tessellation Language (Standart Mozaikleme Dili)
TPMS	: Triply Periodic Minimal Surface (Üçlü Periyodik Minimal Yüzey)

# DOĞRUDAN METAL LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN LATİS YAPILARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Alüminyum alaşımlı latis yapılar giyilebilir teknolojiler, koruyucu ekipmanlar, pil teknolojileri, topoloji optimizasyonu, ısı değıştiriciler gibi birçok alanda talep edilmektedir. Geleneksel üretim yöntemleri ile latis yapıların üretimi uzun sürelerle ve yüksek maliyetli üretim proseslerine neden olmaktadır. Katmanlı imalat yöntemi ile fonksiyonel parçalar ve karmaşık hücreli yapılar geleneksel yöntemlere göre hızlı ve uygun maliyetler ile üretilebilmektedir. Bu çalışmada, metal eklemeli imalat üretim yöntemlerinden biri olan doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) metodu ile AlSi10Mg toz malzemesi kullanılarak Spaceclaim programı üzerinden farklı birim hücre tiplerine göre tasarlanan latis yapılar üretildi. Üretilen yapıların hücre boyutları, Maxwell kriteri, nispi yoğunlukları ve yarı statik basma kuvveti altındaki davranışları incelendi. Nispi yoğunluğun artması ile mukavemetin arttığı ve gerilme hakim yapıların eğilme hakim yapılara göre daha mukavemetli olduğu görüldü. Latislerin mekanik özelliklerinin birim hücre tasarımı ve DMLS işlem parametrelerine bağlı olduğu tespit edildi. Spaceclaim programının tasarlanan birim hücrelerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için Gibson ve Ashby analitik denkleminin katsayıları belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Basma Testi, DMLS, Katmanlı İmalat, Latis Yapı.

## **INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURES PRODUCED BY DIRECT METAL LASER PROCESSING METHOD**

### **ABSTRACT**

Aluminum alloy lattice structures are demanded in many fields such as wearable technologies, protective equipment, battery technologies, topology optimization, heat exchangers. Traditional methods cause long periods and high cost production processes for the production of lattice structures. With layered manufacturing method, functional parts and complex cellular structures can be produced at a fast and affordable cost compared to traditional methods. In this study, lattice structures designed according to the unit cell types selected through the Spaceclaim program were produced by using AlSi10Mg powder material with the direct metal laser sintering DMLS method, which is one of the metal additive manufacturing production methods. Cell sizes, Maxwell criterion, relative densities and behaviors under semi-static compression force were investigated. It was observed that with increasing relative density, the strength increased and the structures with Strength dominating were more resistant than those with bending dominating strength. It was determined that the mechanical properties of lattices depend on unit cell design and DMLS process parameters. The coefficients of the Gibson and Ashby analytical equation, which can be used to estimate the mechanical properties of lattice structures to be created with unit cells designed from the Spaceclaim program, were determined.

**Keywords:** Compression Test, DMLS, Additive Manufacturing, Latis Structure.

## GİRİŞ

Tarihte ilham kaynağı olan ve eşsiz özelliklere sahip bal peteği, pomza taşı, mercan, ağaç ve kemik gibi doğal gözenekli yapılar taklit edilerek geliştirilmeye çalışılmıştır [1, 2]. Gözenekli yapılar, özgül ağırlıkları düşük olmasına rağmen yüksek sağlamlığa sahiptirler. Bu yüzden yapısal ve fonksiyonel uygulamalarda bu yapılara sık rastlanmaktadır. Köpük metallerin açık veya kapalı gözenekleri sayesinde kütle hacim oranları düşüktür. Bu sebeple yoğunlukları kendileri ile aynı hacme sahip gözeneksiz katı yapılara göre daha az olmuştur [3]. Birçok metal ve polimer malzeme hücreli ve köpük yapıda üretilebilirler. Fakat üretimde kullanılan teknikler ve işlem adımları hücreli yapıların farklı biçim ve özelliklerde olmalarına neden olmuştur [4].

Köpük metaller ile ilgili çalışmalar De Miller tarafından 1926 yılında yapılan bir çalışma ile başlamıştır. De Miller çalışmasında inert gaz enjekte ederek veya köpük yapıcı madde ekleyerek kapalı hücreli köpük metalin üretilebileceğini ileri sürmüştür [5]. Ayrıca Benjamin Sosnick kapalı hücreli metalik köpükleri sıvı alüminyumun içine cıva buharı üfleyerek elde etmiş ve bununla ilgili olarak 1948 ve 1951 yıllarında patent almıştır [6, 7]. Kapalı hücreli köpük metaller, John C. Elliott tarafından Bjorksten araştırma laboratuvarlarında alüminyum ve magnezyumu belli oranlarda karıştırmış ve köpürtücü madde olarak  $TiH_2$  ve  $ZrH_2$  kullanarak Miller'in metodunu daha da geliştirilmiş ve 1956 yılında patent alınmıştır [8].

Açık hücreli köpük metaller ile ilgili olarak ilk üretimler 1950'lerde başlamıştır. Eriyik alüminyum kaya tuzuna dökülmüş ve işlem sonunda kaya tuzu alüminyumdan uzaklaştırılarak açık gözenekli köpük elde edilmiştir [4]. 1968 yılında Kaliforniya'da bulunan Enerji Üretim ve Araştırma şirketi tarafından polimerik kalıp ile açık hücreli metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir [9].

1961 yılında ise pil elektrotu olarak poliüretan köpüğün geometrisinde açık hücreli köpük metal üretilmiş ve patenti alınmıştır [10]. 1972 yılında Ethyl şirketi, ürettiği olduğu yüksek kaliteli alüminyum köpüğü değerlendirmesi için Ford Motor

Şirketi'ne göndermiştir. Fakat bu girişimler başarısızlıkla sonuçlanmıştır. 1975 yılından sonra metal köpük Ar-Ge çalışmalarının sayısı azalmasına karşın 1980'lerin sonlarında metal köpük araştırmaları tüm dünya da yeniden canlılık kazanmıştır [11]. Davies ve Zhen tarafından yapılan, metalik hücresel malzemeler ile ilgili araştırmaların ve deneysel bulguların derlendiği çalışma 1983 yılında yayımlanmıştır. Daha sonrasında gözenekli malzemelerin üretimi, mekanik özellikleri ve kullanım uygulamalarını ele alan çalışmalar yapılmıştır [12].

Gibson, hücresel malzemeleri “birbirine bağlı bir destek veya plaka ağı” olarak tanımlamıştır [13]. Latis yapıların birim hücrelerinin düzenli ve homojen olmasından dolayı köpük yapılardan ayrılmışlardır [14]. Latis yapılar döküm, çeşitli kompozit üretim yöntemleri, sıcak pres veya filaman sarımı gibi yöntemler ile üretilebilmektedir [15]. Geleneksel üretim yöntemleri kullanarak köpük ve bal peteği gibi düzenli geometriye sahip yapılar dışında karmaşık tasarlanmış hücresel yapıların üretimi yüksek maliyetli ve meşakkatli olmuştur [16]. Bununla birlikte, üretim kısıtlarının az olduğu katmanlı imalat (Kİ) teknolojisinin 2000 yılına doğru kullanımının artmasıyla latis yapıların üretim ve araştırma çalışmaları için zemin hazırlamıştır [17].

2005 yılı ile ilk defa doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile latis yapıların üretimi ve mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir [18]. DMLS metodu ile geleneksel yöntemlere göre karmaşık tasarımların üretimi yapılabilmekte ve mekanik özellikler bakımından da avantaj sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar DMLS ile üretilen latis yapıların Gibson ve Ashby modeline yakın olduğunu göstermiştir [19].

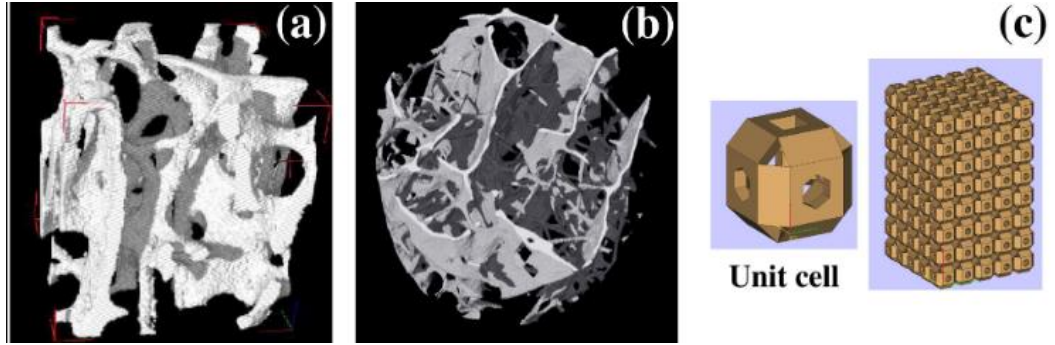
Bu çalışmada AlSi10Mg malzeme ve DMLS yöntemi kullanılarak farklı latis yapıların üretimi gerçekleştirildi. Spaceclaim programında tasarlanan farklı tip latisler ile işlem parametresi değiştirilerek üretilen gözenekli numunelerin basma kuvveti altındaki davranışları ve mikroyapı özellikleri incelendi. Bölüm 1'de literatür araştırması yapıldı. Bölüm 2'de latis yapılar, katmanlı imalat teknolojileri ve alüminyum malzemesi tanıtıldı. Bölüm 3'te çalışmada kullanılan materyal ve metotlar verildi. Bölüm 4'te deney numuneleri, işlem parametreleri ve yapılan tasarımlara ait bilgiler verildi. Bölüm 5'te deneysel olarak yapılan çalışmaların sonuçları verildi ve bölüm 6'da elde edilen bulgular yorumlandı ve öneriler yapıldı.

## 1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde DMLS metodu kullanılarak üretilmiş latis yapılar ile ilgili literatür araştırması yapıldı.

Pattanayak ve arkadaşları Kİ yöntemlerinden olan DMLS metodu ile 0,5-2 mm arasında değişen farklı boyutlardaki gözeneklilikte Şekil 1.1'de gösterilen latis yapıları üretmişlerdir. Çalışmalarında latis plaka örnekleri ile ticari saf Ti tozları kullanılarak lazer gücü, tarama hızı ve tarama şekli gibi işleme parametrelerinin plaka örneklerinin yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Latis yapıları, EOS M270 makinesi kullanılarak 45  $\mu\text{m}$ 'nin altı toz büyüklüğüne sahip ticari saf Titanyum tozu ile 225 mm/s tarama hızı, 30  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı ve 90 ile 180 W arasında farklı lazer güçleri ile üretmişlerdir. Numunelere argon gazı atmosferinde 1300 °C'de 1 saat ısıtım uygulanmıştır. Basma testlerini Shimadzu Marka EHF-LV020K1-010 test cihazı ile 1 mm/dak hızı ile yapmışlardır.



Şekil 1.1. Süngerimsi kemik yapılar ve latis yapılar a, b) süngerimsi kemik taramaları, c) latis yapı [20]

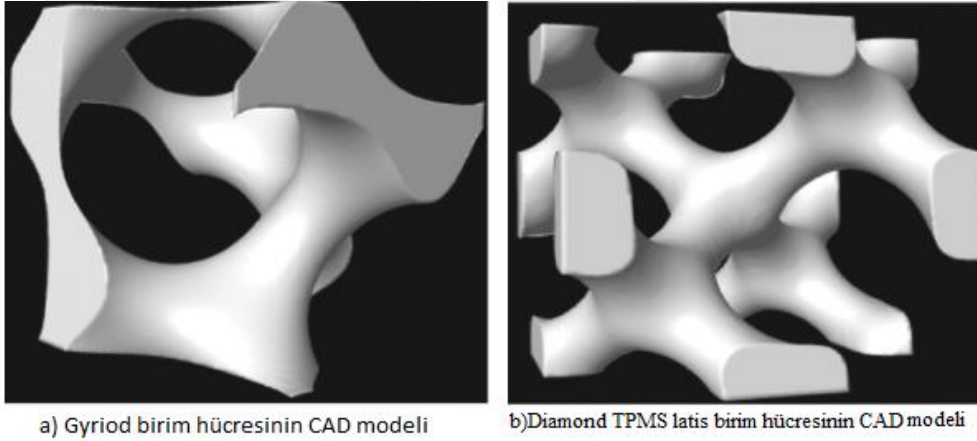
Çalışma sonucunda;

- Gözenekler %55-75 aralığında olduğunda basma dayanımının 35-120 MPa olduğunu,
- DMLS yöntemi ile toz sinterleme yöntemini karşılaştırdıklarında, DMLS ile ürettikleri latislerin basma dayanımlarının daha yüksek olduğunu,
- Basma dayanımının artan gözeneklilik ile azaldığını,

- DMLS işleminin metalik implant üretimi için yararlı bir teknik olduğu ve bu latislere kimyasal ve ısıt işlem uygulamalarından sonra kemik yapı için daha uygun olabileceğini gözlemlemişlerdir [20].

Yan ve arkadaşları implantlar için %80-95 gözeneklilikte Şekil 1.2'de gösterilen sırası ile 560-1600  $\mu\text{m}$  ve 480-1450  $\mu\text{m}$  aralığında gözenek boyutlarına sahip gyroid ve diamond triply periodic minimal surface (TPMS) yapıları üretmişlerdir.

3-50  $\mu\text{m}$ 'lik bir parçacık boyutu dağılımı ve 20  $\mu\text{m}$ 'lik ortalama parçacık boyutuna sahip EOS firmasının Ti6Al4V tozunu kullanarak EOS M270 makinesi ile üretim yapmışlardır. Üretim parametresi olarak argon ortamında 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 60  $\mu\text{m}$  tarama aralığı ve 30  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı kullanmışlardır. Numunelere 680 °C'de 4 saat süreyle ısıt işlem uygulamışlardır.



Şekil 1.2. Latis birim hücresi a) gyroid birim hücresi, b) diamond triply periodic minimal surface birim hücresi [21]

Çalışma sonucunda;

- %80-95 gözeneklilik TPMS latislerin 0,12-1,25 GPa aralığında olan modüllerinin trabeküler kemik modülüne yakın olduğunu,
- DMLS ile üretilen Ti6Al4V TPMS kafeslerinin mekanik özelliklerini tahmin etmenin ve tasarlanmanın mümkün olduğunu,
- Gyroid TPMS latislerin %80-95 porozitede 0,13–1,25 GPa elastik modüle ve 6,50 - 81,30 MPa akma mukavemetine sahip olduğunu,

- Diamond triply periodic minimal surface latis modelinin %80-95 porozitede 0,12–1,25 GPa elastik modüle ve 4,66-69,21 MPa basma mukavemetine sahip olduğunu,
- Diamond triply periodic minimal surface kafeslerinin bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri ile mikro-CT taramaları karşılaştırdıklarında, tasarım verisi ile üretim verilerinin uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir [21].

Leva ve arkadaşları çalışmalarında iki farklı enerji parametresi kullanarak Şekil 1.3'te gösterilen ve hücre boyutları değişen latis yapıları incelemişlerdir. Üretimlerini Ti6Al4V tozu ile yapmışlardır. Kullandıkları Ti6Al4V tozunu Mastersizer S-MAN 5005 test cihazı ile analiz ederek d10, d50 ve d90 toz dağılım oranlarını sırası ile 29 µm, 43 µm ve 68 µm olduğunu tespit etmişlerdir.

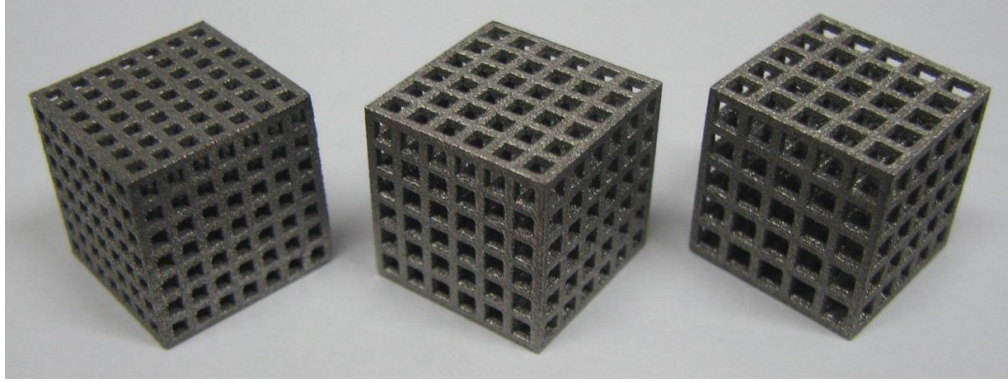
Üretimleri EOS M270 makinesi ile 2 farklı üretim parametresi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları parametrelerden birincisinin işlem parametreleri 170 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 100 µm tarama aralığı, 30 µm katman kalınlığı ve 45,3 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğundadır. Daha fazla enerji yoğunluğu olan ikinci parametrenin işlem parametreleri ise 117 W lazer gücü, 225 mm/s tarama hızı, 100 µm tarama aralığı, 30 µm katman kalınlığı ve 173,3 J/mm<sup>3</sup> enerji yoğunluğundadır. Ürettikleri ürünleri 1 saat boyunca 1050 °C'de vakumlu fırın içinde ısıtılma tabii tutmuşlardır. Basma deneyini 2 mm/dak hız ile yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları literatürde bulunan seçici elektron ışını eritme (EBM) teknolojisi ile yapılan çalışmalarla beraber Gibson ve Ashby modeli ile kıyaslamışlardır. Gibson ve Ashby modelinde elastik modülü ve akma mukavemeti Denklem (1.1) ve Denklem (1.2)'de verilen,

$$\frac{E}{E_0} = C_E \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{k_E} = C(1-P_r)^{k_E} \quad (1.1)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = C_Y \left( \frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{k_Y} = C(1-P_1)^{k_E} \quad (1.2)$$

Formülü ile hesaplanmıştır. Burada E, σ, ρ sırasıyla kafes yapının elastik modülü, akma mukavemeti ve yoğunluğudur. E<sub>0</sub>, σ<sub>0</sub>, ρ<sub>0</sub> ise sırasıyla ana malzemenin elastik modülü, akma mukavemeti ve yoğunluğudur. P<sub>1</sub> ise kafes yapının porozitesidir.





Şekil 1.3. Enerji yoğunluğu değiştirilerek üretilen latisler [22]

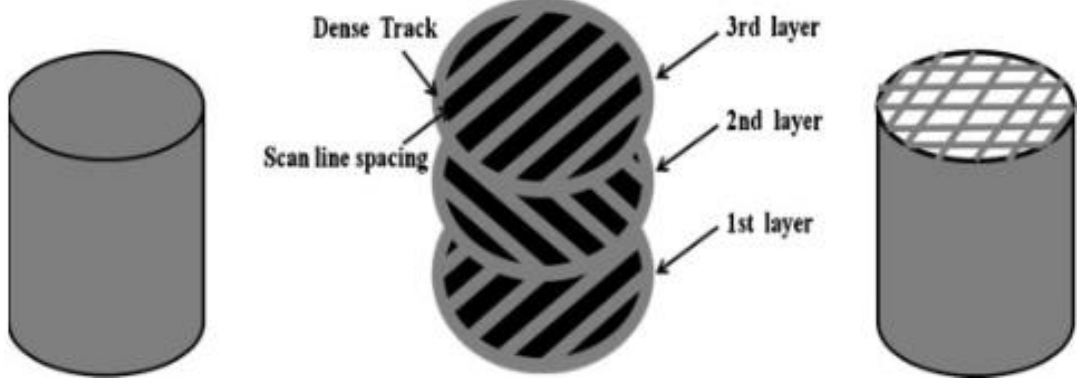
Çalışma sonucunda;

- Ürettikleri latislerin akma dayanımı 92-170 MPa ve maksimum basma dayanımları 106-219 MPa aralığında olduğunu,
- Elastik modülün 5,36–8,73 GPa aralığında olduğunu,
- Yüksek enerji ile üretilen örneklerin yüzeylerinin porozlu yapıda olduklarını,
- Yüksek enerjiye sahip parametre ile üretilen ürünlerin daha ince desteklere sahip olup bu desteklerin daha yüksek seviyelerde oksijen ve azot içerdiklerini,
- DMLS ile üretilen latislerin mekanik özelliklerinin Gibson ve Ashby modeliyle uyumlu olduğunu,
- SLM ve EBM arasındaki karşılaştırma, SLM/DMLS metodunun belirli bir nispi yoğunluk için daha yüksek mekanik özellikler gösterdiğini gözlemlemişlerdir [22].

Zhang ve arkadaşları, biyomedikal uygulamalar için ürettikleri gözenekli yapılarda lazer tarama aralığının etkisini incelemiştir. İşlem parametresi olarak 130 W lazer gücü, 300 mm/s tarama hızı, 35  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı ve 200-700  $\mu\text{m}$  arasında tarama aralığı kullanılmıştır. Kullanılan Ti6Al4V tozların ortalama partikül büyüklüğü yaklaşık 65  $\mu\text{m}$  ve partikül büyüklüğü dağılımı 20  $\mu\text{m}$  ila 120  $\mu\text{m}$  arasındadır.

Basma testi ve gözeneklilik karakteristik testi için 8 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda silindirik test numuneleri kullanılmıştır. Üretilen gözenekli yapılar CAD ile oluşturulmuş belirli tasarımlar yerine Şekil 1.4'te şematik diyagramında

gösterildiği gibi lazer tarama aralığı değiştirilerek oluşturulur. Basma testini  $0,001 \text{ s}^{-1}$  gerilme hızında 100 kN yük hücresi ile gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.4. Lazer tarama aralığı değiştirilerek oluşturdukları gözenekli yapının şematik diyagramı [23]

Numunelerin morfoloji ve mikro yapı incelemeleri için zımpara ve elmas macunu kullanılmıştır. Parlatılan numuneleri 30 s süre ile 100 ml  $\text{H}_2\text{O}$ , 5 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  ve 2 ml HF çözeltisi ile dağlamışlardır. Numunelerin porozitelerini Denklem (1.3)'te verilen;

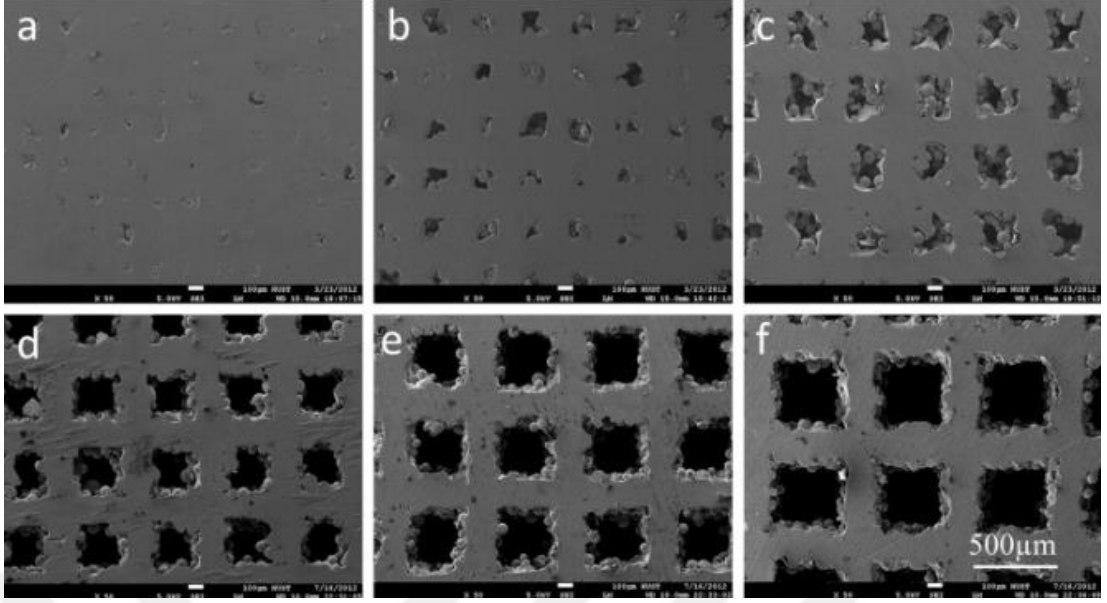
$$\text{Porozite} = 1 - \frac{\frac{M}{V}}{\rho_{\text{Ti6Al4V}}} \quad (1.3)$$

Gravimetrik denklem ile hesaplamışlardır. Burada  $\rho$  yoğunluğu,  $V$  hacmi ve  $M$  kütleyi ifade etmektedir. Ti6Al4V malzemenin yoğunluğunu  $4,43 \text{ g/cm}^3$  almışlardır.

Young modülünü tahmin etmek için Nielsen ilişkisi kullanmışlardır. Denklem (1.4)'te ilgili eşitlik görülmektedir;

$$E = E_m \times \frac{(1-v)^2}{1 + \left(\frac{1}{\rho} - 1\right) \times v} \quad (1.4)$$

Verilen formülde,  $E$  young modülü,  $E_m$  ana malzemenin young modülü,  $v$  gözenekli yapının hacim fraksiyonu ve  $\rho$  ise gözenek şekline göre geometrik faktördür.

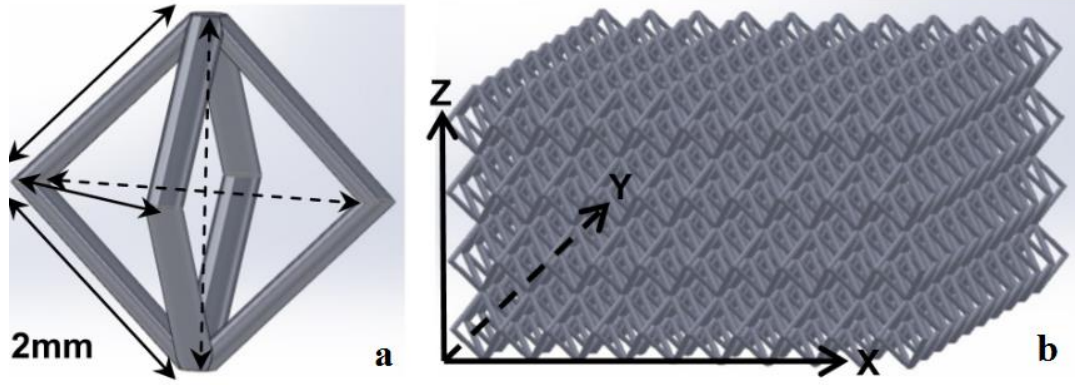


Şekil 1.5. Farklı tarama aralıkları ile üretilen yapıların SEM görüntüleri [23]

Çalışma sonucunda;

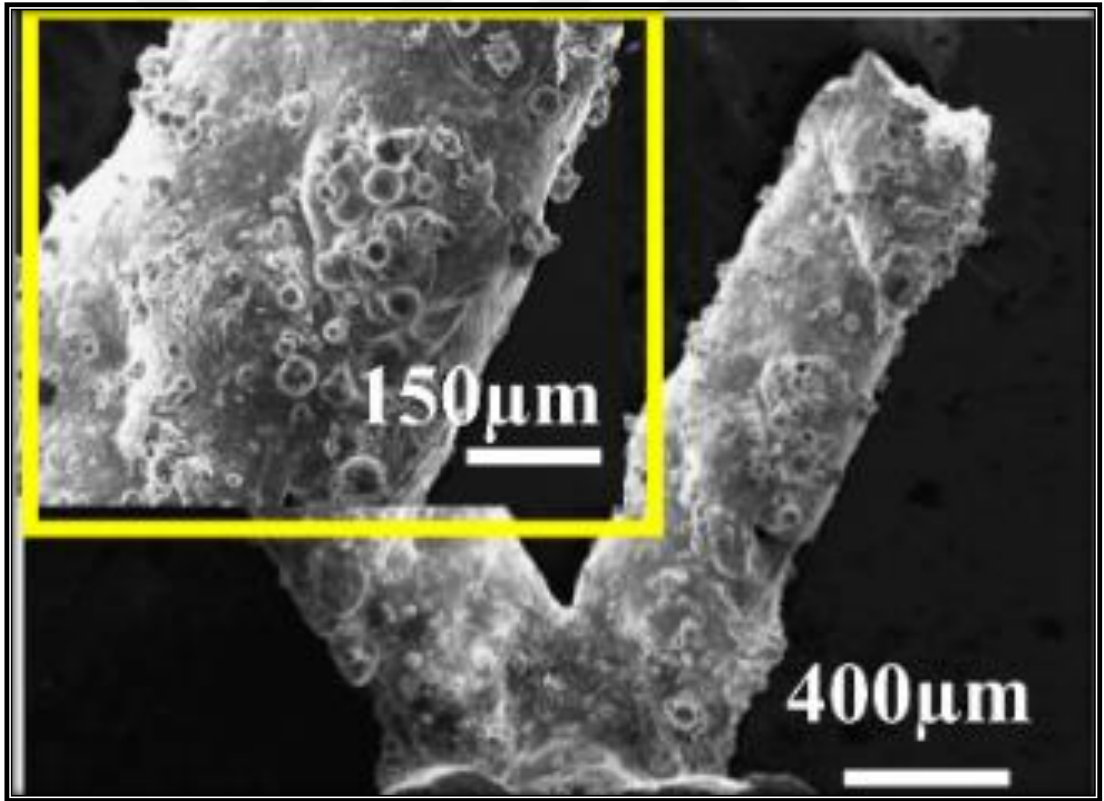
- Üretim sonrasında farklı tarama aralığındaki numunelerin Şekil 1.5'te gösterilen 50x büyütme ile SEM görüntülerini almışlardır. Alınan SEM görüntüleri ile tozların kanallardan geçebilmesi ve açık gözeneklerin oluşabilmesi için gözenek çapının toz parçacık boyutundan daha büyük olması gerektiğini,
- Kısmen erimiş toz parçacıklarının dikme yüzeylerine yapıştığını,
- Toz parçacık boyutunun gözeneklilik oluşumu üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu,
- Tarama aralığını değiştirerek ürettikleri numunelerin 467-862 MPa aralığında akma mukavemetinde ve 16-85 GPa aralığında young modülünde olduğunu,
- Nielsen'in ilişkisi kullanılarak hesaplanan young modülü, deneysel değerleri ile uyduğunu,
- Lazer nokta boyutunun dikme genişliğini belirlediğini gözlemlemişlerdir [23]

Qiu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada tarama hızının latis yapıların dikme boyutu, morfoloji ve yüzey yapıları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üretimleri Concept Laser M2 makinesi ile TLS Technik GmbH firmasının 25–50 µm boyutlarında AlSi10Mg tozu ile yapmışlardır.



Şekil 1.6. Qiu ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları latis yapı a) birim hücresi b) kafes yapısı [24]

İşlem parametresi olarak 7000 mm/s'lik sabit bir lazer tarama hızında 150 W ila 400 W arasında değişen lazer güçleri kullanmışlardır. Basma testlerini 0,2 mm/dak hız ile Şekil 1.6'da CAD modeli gösterilen numuneler ile gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.7. 375 W lazer gücü ve 7000 mm/s tarama hızı ile üretilen latisin SEM görüntüsü [24]

Çalışma sonucunda;

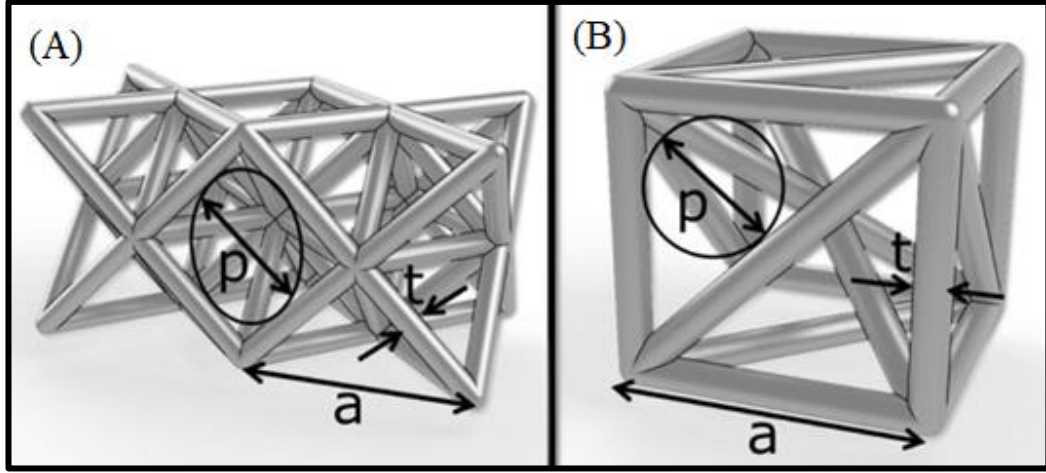
- Yüksek lazer güçlerinin, tasarlanan dikme çaplarından daha büyük sapma ile daha kalın dikmelerin oluşmasına neden olduğunu,
- Şekil 1.7’de de görüldüğü gibi artan güç ile orantılı olarak kısmen sinterlenmiş toz parçacıklarının artarak yapıştığını,
- Yüksek lazer gücünün latis payandalarının daha fazla toz yapışmasına yol açtığını,
- Özgül akma mukavemetinin işlem koşullarından bağımsız olmadığını,
- Lazer gücü artışı ile dikme çapının arttığını ve lazer tarama hızının dikme çaplarını daha çok etkilediğini,
- Basma testinde latis yapıların yük taşıma kapasitesi, dikme çapı ile artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir [24].

Arabnejad ve arkadaşları Şekil 1.8’de gösterilen 2 farklı tip latisin sertlik ve mukavemetini incelemişlerdir. Renishaw AM250 makinesi ile Ti6Al4V tozundan üretim yapmışlardır.

Kullandıkları lazer gücü 200 W, enerji yoğunluğu 60 J/mm<sup>3</sup> ve katman kalınlığı 30 µm’dir. Latislere argon ortamında 2 saat boyunca 720 °C ’de ısıl işlem uygulamışlardır. Yüksek yapısal verimliliğe ve mukavemete sahip latisler üretmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile ilk kez kemik büyümesinin ortaya çıktığını göstermişlerdir. Latis yapısı olarak tetrahedron hücrelerini ve oktet kafes hücrelerini seçmişlerdir. Poroziteyi Denklem (1.5)’te verilen;

$$\text{Porozite (\%)} = 1 - \frac{V_s}{V_{in}} \quad (1.5)$$

Formülü ile hesaplamışlardır. Burada V<sub>s</sub> gözenekli yapının hacmi ve V<sub>in</sub> tam olarak katı hacmi ifade etmektedir. Basma testlerini 50 kN MTS test cihazı kullanarak 0.01 s<sup>-1</sup> sabit bir gerinim oranı ile yapmışlardır.



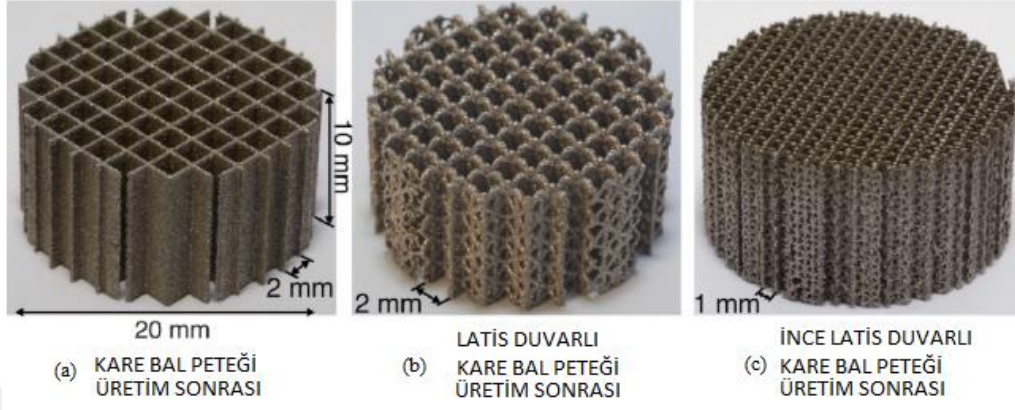
Şekil 1.8. Birim hücreler a) Octet truss birim hücresi, b) Tetrahedron birim hücresi için geliştirilmiştir [25]

Çalışma sonucunda;

- %50 porozite oranında tetrahedron tip latislerin %75 ila %85 arasında gözeneklilik gösteren tantal köpüklere göre 5 kat daha mukavemetli olduğunu,
- %60 tasarım gözenekliliğinde octet truss latislerin stokastik köpüğe kıyasla daha yüksek mukavemet gösterdiğini,
- %50 porozitede octet truss ve tetrahedron latislerin maksimum basma dayanımını sırası ile  $228 \pm 10$  MPa,  $219 \pm 8$  MPa,
- %60 porozitede octet truss ve tetrahedron latislerin maksimum basma dayanımını sırası ile  $145 \pm 34$  MPa,  $136 \pm 23$  MPa,
- %70 porozitede octet truss ve tetrahedron latislerin maksimum basma dayanımını sırası ile  $31 \pm 2$  MPa,  $120 \pm 4$  MPa,
- %75 porozitede octet truss ve tetrahedron latislerin maksimum basma dayanımını sırası ile  $39 \pm 3$  MPa,  $68 \pm 3$  MPa olduğunu,
- Literatürdeki eşit porozite oranında hücre ve dikme büyüklüğü arttıkça mukavemet ve sertliklerinin azaldığı görülmesine rağmen bu çalışmada test edilen her iki topoloji için, gergi kolu kalınlığı ve gözeneklilik eşdeğer olduğu,
- Literatürdeki çalışmaların tersine tetrahedron'un yüksek gözeneklilikteki (%70) mukavemetinin önemli ölçüde daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir [25].

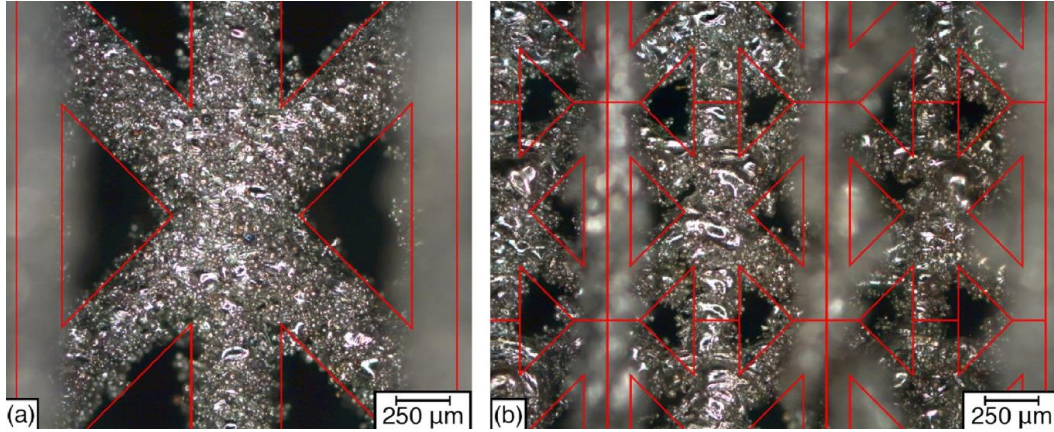


Harris ve arkadaşları çalışmalarında Şekil 1.9.a'da gösterilen petek yapının duvarlarına latis yapılar ile birleştirerek Şekil 1.9.b ve Şekil 1.9.c'de gösterilen hibrit petek, latis yapıları tasarlamışlardır.



Şekil 1.9. Bal peteği ve hibrit modelleri a) kare bal peteği, b)latis duvarlı kare bal peteği ve c)ince latis duvarlı kare bal peteği [26]

Tasarladıkları yapıların statik ve dinamik basma kuvveti altında gösterdikleri davranışları incelemişlerdir. Numuneleri paslanmaz çelik 316L malzemesinden EOS M280 cihazında üretmişlerdir. Kullandıkları tozun parçacık boyutu 20-40  $\mu\text{m}$  arasındadır.



Şekil 1.10. Birim hücrelerin optik mikroskop görüntüleri a) latis duvarlı kare petek, b) ince latis duvarlı kare petek [26]

Çalışma sonunda;

- Şekil 1.10'da optik mikroskoptan aldıkları görüntüler ile tasarladıkları geometrilerin olması gereken ölçülerini kırmızı çizgiler ile göstermişlerdir. Fazla

toz parçacıklarının numune üzerine yapıştığını ve bu fazla tozların nominal sınırları önemli ölçüde aşmadığını,

- Yarı statik basma testinde latis duvarlı hibrit bal petekleri literatür ile kıyasladıklarında tasarımlarının normalize edilmiş mukavemette ve spesifik enerji emilimine sahip olduğunu,
- Kare bal peteği yapının latis duvarlı hibrit bal peteklerine göre düşük mukavemet ve enerji emilimi gösterdiğini,
- Dinamik deformasyon sonucunda kare bal peteğin latis duvarlı yapılara göre yoğunlaşma noktasına kadar daha fazla enerji emilimi gösterdiğini,
- Kare bal peteğinin 50 ve 150 m/s darbe hızlarında yüksek verimlilikte olduğunu,
- Tasarladıkları latis duvarlı bal peteklerin 100 m/s darbe hızında daha yüksek verimlilik gösterdiğini gözlemlemişlerdir [26].

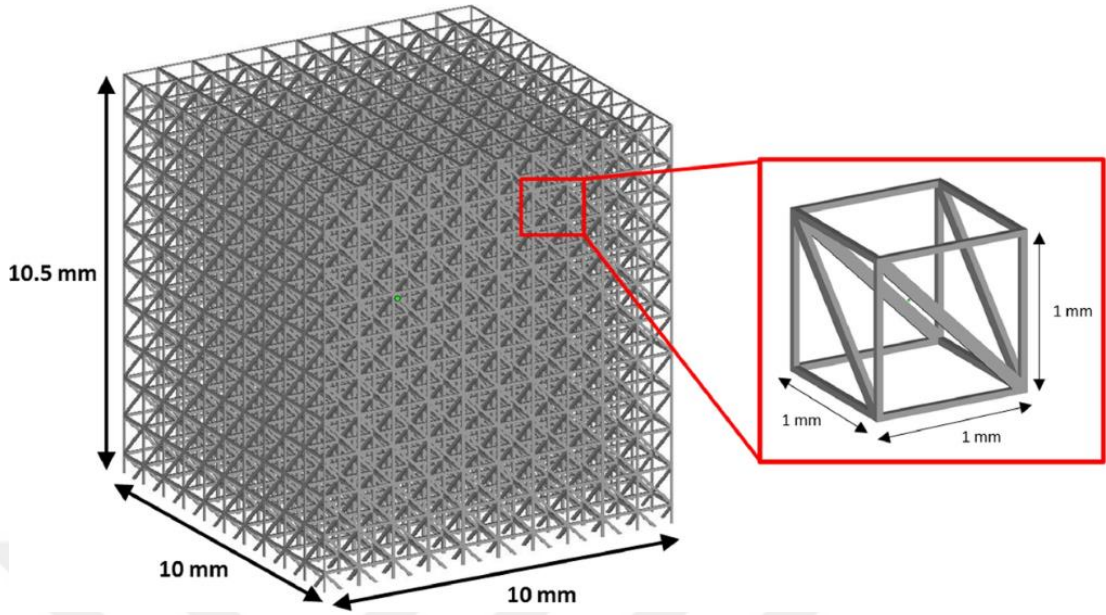
Sing ve arkadaşları yaptıkları çalışmada işleme parametrelerinin, latis yapıların boyutsal doğruluğu ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Numuneleri ortalama parçacık büyüklüğü 43,5 µm ve küresel yapıya sahip ticari saf titanyum tozları ile ortalama parçacık boyutu 44 µm büyüklüğünde ve düzensiz yapıdaki tantal tozlarını aynı ağırlık oranı ile 12 saat boyunca 60 rpm hızında karıştırmışlardır. Titanyum-tantal alaşımı ile SLM 250 HL makinesinde latis yapıları üretmişlerdir. Şekil 1.11’de tasarladıkları latis yapının birim hücresi, lazerin nokta boyutuna karşılık gelen 0,080 mm kenarlı dikey, yatay ve diyagonal kare çubuklar şeklindedir. Üç farklı işlem parametresi ile 3<sup>3</sup> faktöriyel olacak şekilde istatistiksel analiz yapmışlardır.

Lazer gücü 120, 240, 360 W, tarama aralığı olarak 400, 800, 1200 mm/s ve katman kalınlığı 30 µm, 50 µm, 100 µm’dir. Latislerin yoğunluklarını atmosfer koşullarında 0,001 g hassasiyete sahip terazi ile ölçtükleri gerçek ağırlıklarını, parçaların hacmine bölünmesiyle hesaplanmışlardır. Porozite hesapları için Denklem (1.6)’da verilen;

$$\text{Porozite (\%)} = 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1.6)$$

Formülünü kullanmışlardır.  $\rho_1$  gerçek ağırlık ölçümü ile hesaplanan yoğunluk ve  $\rho_2$  ana malzemenin yoğunluğudur. Basma testlerini 0,6 mm/dak hızında 50 kN yükte gerçekleştirmişlerdir.





Şekil 1.11. Sing ve arkadaşlarının tasarladıkları latis yapı [27]

Çalışma sonucunda;

- Kafes yapılarının elastik modülünün 1,36 GPa ile 6,82 GPa arasında değiştiğini,
- SLM/DMLS işlem parametrelerinin nihai geometriye etkisinin büyük olduğunu,
- Ürettikleri kafes yapıların elastik modülünün ve akma mukavemetinin gözeneklilikteki artışla azaldığını ve Gibson ve Ashby modelindeki eğilimlerle tutarlı olduğunu,
- SLM/DMLS işlem parametrelerinin latis yapıların mekanik özelliklerini etkilediğini,
- İşlem parametrelerinin dikme boyutlarına olan etkisinde ise katman kalınlığı ve tarama hızına kıyasla lazer gücünün daha fazla etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [27].

Zhou ve arkadaşları faz değiştiren termal kontrolörler için latis yapı tasarlamışlardır. Latisleri Concept X-line 1000R makinesi ile AlSi10Mg tozundan üretmişlerdir.

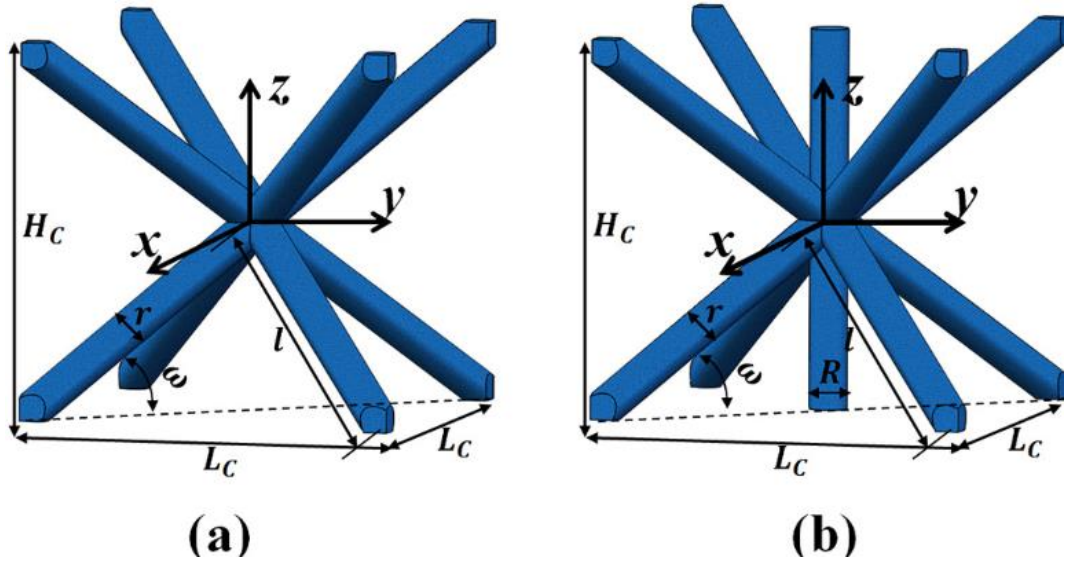
370 W lazer gücü, 1500 mm/s tarama hızı, 0,19 mm tarama aralığı ve 30 µm katman kalınlığında üretim yapmışlardır. Kullanılan AlSi10Mg tozunun tane boyutu 0-62 µm çapında ve kümülatif dağılım eğrisinde %10, %50, %90 arasında olan  $d_{10} \geq 15 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 40 \mu\text{m}$  ve  $d_{90} \leq 62 \mu\text{m}$ 'dir. Üretilen parçalara 250 °C'de 4 saat ısıl işlem uygulamışlardır.

Çalışma sonucunda,

- Latis yapıların faz değiştiren bir termal kontrolörün hafif yapısının KI ile üretilebilir olduğunu, gerekli mekanik ve termal özellikleri karşıladığını,
- Tasarlanan latislerin kütle azalmasının geleneksel ürünlerde gözlenenin %60'ından fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [28].

Lei ve arkadaşları Şekil 1.12'de gösterilen iki farklı tipte çok katmanlı latis sandviç panel yapıların X ışını bilgisayarlı tomografi ( $\mu$ -CT) ve sonlu elemanlar analizi kullanarak geometrik ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Üretimleri AlSi10Mg tozu ile EOS M280 makinesinde gerçekleştirmişlerdir.

Çalışmada kullanılan makinenin lazer gücü 370 W ve tarama hızı 1500 mm/s'dir. Tarama aralığı 0,13 mm ve katman kalınlığı 30  $\mu$ m'dir. Üretilen parçalara 250 °C'de 4 saat ısıl işlem uygulamışlardır. Basma testlerini Instron 5569 üniversal test makinesinde 0,5 mm/dak ile oda sıcaklığında yapmışlardır.



Şekil 1.12. Farklı birim hücre tipleri a) BCC ve b) BCCZ [29]

Çalışma sonucunda,

- Latis sandviç panellerin sıkıştırma modülü ve ilk kırılma mukavemetinin, artan katman sayısında azaldığını,

- Yapılan X ışını mikro bilgisayarlı tomografi sonucunda her iki tip latis panelinin çapraz dikmesi için %75'ten fazla bir kesit çapı sapması olduğu ve BCCZ kafes panelinin dikey dikmelerinin kesit çapı sapması %88'den fazla olduğunu,
- Tek katman BCCZ latisin basma dayanımı 490 MPa, BCC tip latisin ise 198,62 MPa olduğunu,
- Kafes yapısındaki tutarsızlığın tasarım (çapraz, dikey dikme) yönü ve açının etkisi olduğu, basma modülü ve ilk ezilme mukavemeti açısından tahmin sonuçlarının deneysel sonuçlar ile tutarlı olduğunu gözlemlemişlerdir [29].

Alabort ve arkadaşları kemiklerin mekanik özelliklerine uyacak şekilde 200-500 µm arasında minimal yüzeyler kullanarak tasarladıkları Schwarz D 'Diamond', Neovious ve Schoen's Gyroid üç farklı latis yapının geometri ve boşluk oranları ile yüzey bazlı kafeslerin uygunluğunu araştırmışlardır. Titanyum alaşımı olan Ti6Al4V tozu kullanarak Renishaw AM250 makinesi ile üretim yapmışlardır.

Çalışmada 200 W lazer gücü ve 0,065 mm tarama aralığı ve 30 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. İmalattan sonra parçalara 4 saat boyunca 800 °C'de vakumlu fırında ısıl işlem uygulamışlardır. Mekanik testleri 0,6 mm/s'lik bir hız ile yapmışlardır.

Çalışma sonucunda,

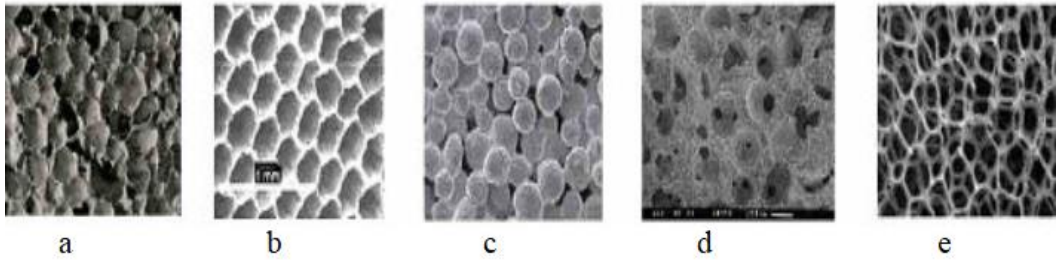
- Latislerin nispi yoğunluğu arttıkça mukavemetin arttığını,
- Geometrilerin plato bölgesindeki davranışlarına göre Schwarz D ve Gyroid yapılarda, %25 ve altında salınımlar gösterirken, Neovious yapısında salınım gözlenmediği ve gerilme-gerinim eğrileri pürüzsüz bir plastik plato gösterdiğini,
- Mevcut titanyum kafes yapılarının hem kortikal hem de trabeküler kemiğin sertliğini ve mukavemetini taklit etme kabiliyetini gösterdiğini gözlemişlerdir [30].

## 2. GENEL BİLGİLER

Tezin bu bölümünde hücrenel ve gözenekli yapıların, katmanlı imalat teknolojisinin, DMLS üretim metodunun ve alüminyum malzemesinin incelemesi yapılmıştır.

### 2.1. Hücrenel ve Gözenekli Yapılar

Köpük metaller ya da gözenekli yapılar, son yıllarda enerji kaynaklarının verimli olarak kullanılması amaçlanarak araştırma ve geliştirme konusu olmuştur. Metalik köpükler ile ilgili birkaç farklı ifade bulunmaktadır. Hücrenel metaller, en genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur. Gözenekli Metaller, metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunurlar. Köpük metaller, hücrenel metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreleri kapalı, küresel, çokyüzlü veya her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır. Metalik süngerler, hücrenel metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur. Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hücrenel bir yapıdadırlar fakat süngerimsi metaller gözenekli yapıda olsa bile hücrenel bir yapıda olmak zorunda değildir. Bazen bu malzemelerin ayırt edilmesi kolay değildir.



Şekil 2.1. Gözenekli metal yapılar a) köpük metal, b) bal peteği, c,d,e) sünger metaller [31]

Şekil 2.1.a'da alüminyum köpük metal, Şekil 2.1.b'de hücrelerin tek boyutta yayıldığı demir esaslı hücrenel metal, Şekil 2.1.c'de sünger metal oluşturan bronz tozu, Şekil 2.1.d'de alüminyum sünger ve Şekil 2.1.e'de nikel sünger gösterilmiştir [31–34].

Ahşap, mantar ve kemik gibi doğal yapıları taklit edilerek köpük ve petek gibi malzemeler elde edilmiştir. Gözenekli yapılar yüksek özgül mukavemet ve sertlikleri sayesinde hafifletme ve tasarım alanları için bir seçenek olmuştur [35]. Hücreli yapılar enerji emilimi, hafifletme, ısı değiştirici gibi birçok alanda da kullanılmıştır [36].

Bununla birlikte, yeni bir üretim alanı olarak Kİ teknolojisi ile kafes yapıların imalatında çok fazla araştırmalar yapılmıştır [17]. Kİ teknolojilerinden olan DMLS yönteminin geleneksel metotlara göre üretim kısıtlamaların az olmasından ve kısa sürelerde üretim yapılabilmesinden dolayı latis yapılar ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır [37].

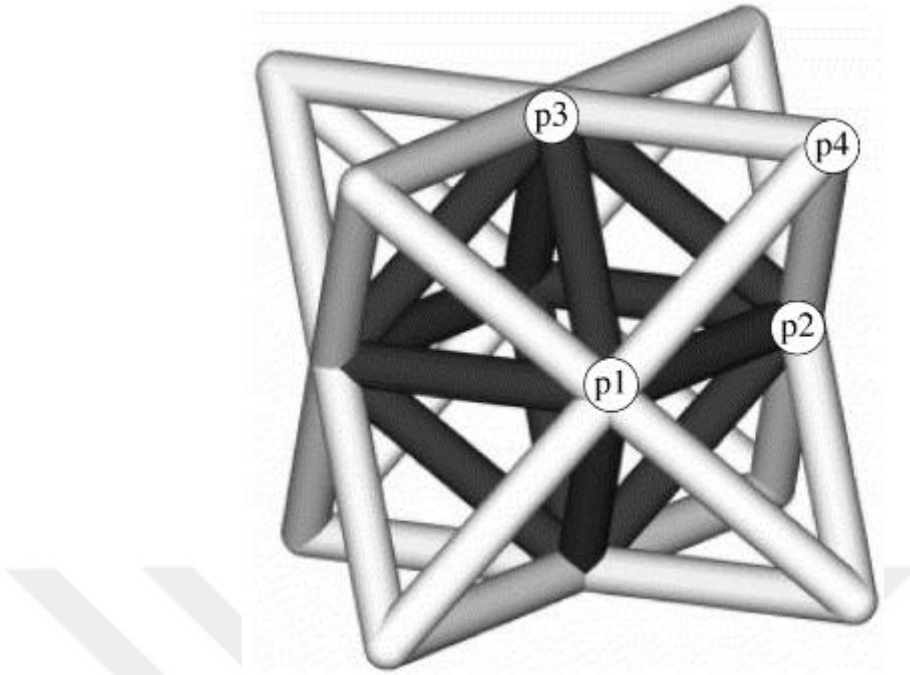
## 2.2. Latis Yapılar

Literatürde en yaygın latis yapı örnekleri hacim merkezli kübik yapı (BCC), yüzey merkezli kübik (FCC) ve bunların varyasyonlarından oluşmaktadır. Dikme temelli latis yapıların tercih edilme sebebi tasarımlarının kolay olmasından dolayıdır [38].

Dikme tabanlı latis yapılar Maxwell denge kriteri ile karakterize edilmişlerdir [39]. Maxwell denge kriteri Denklem (2.1)'de verilen,

$$M=s-3n+6 \quad (2.1)$$

Formülü ile hesaplanmaktadır. Burada s dikme sayısını ve n düğüm sayısını ifade eder [39]. Eğer  $M < 0$  ise eğilme hakim yapı,  $M \geq 0$  ise gerilme hakim yapıdır. Şekil 2.2'de gerilme hakim yapı görülmektedir. Burada p1,2,3 ile numaralandırılmış kısımlar düğümleri, beyaz ve siyah uzantılar ise dikmeleri ifade eder [39]. Gerilme hakim yapılar basma gerilmesi taşırlar, eğilme hakim yapılar ise dikmelerin yer değiştirmelerinden dolayı bükülme hareketi gösterirler. Bundan dolayı gerilme hakim yapılar sert ve mukavemetlidir. Eğilme hakim yapılar ise bükülme ağırlıklı oldukları için daha uyumlu deforme olurlar [40].



Şekil 2.2. Dikme ve düğüm yapısı örneği [39]

Latis, köpük, petek, sünger gibi gözenekli yapıların nispi yoğunlukları ve malzeme özellikleri kullanılarak mekanik, termal ve elektriksel davranışları ve özellikleri tahmin edilebilir. Gibson ve Ashby modeli, latis yapılar, köpük yapılar gibi gözenekli yapıların özelliklerinin hesaplanması için en yaygın kabul gören modeldir [40].

Gibson ve Ashby modeli Denklem (2.2), Denklem (2.3), Denklem (2.4) ve Denklem (2.5)'te verilen,

$$\frac{E_L}{E_0} = C_1 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_0} = C_2 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

$$\frac{E_L}{E_0} = C_1 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_0} = C_2 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (2.5)$$

Formüller ile hesaplanmaktadır.  $E_0$ ,  $\sigma_0$  ve  $\rho_0$  latisin üretildiği malzemenin sırası ile elastisite modülü, akma mukavemeti ve yoğunluğunu ifade eder.  $E_L$ ,  $\sigma_L$  ve  $\rho_L$  ise latis yapının sırası ile elastisite modülü, akma mukavemeti ve yoğunluğunu ifade eder. Burada  $C_1$  ve  $C_2$  değişkenleri sırası ile 1-4 ve 0,25–0,35 değerli arasındadır. Denklem (2.2) ve Denklem (2.3) eğilme hakim yapılar yani  $M < 0$  için kullanılmaktadır. Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) gerilme hakim yapılar yani  $M \geq 0$  için kullanılmaktadır [40].

Şekil 1.12’de gösterilen birim hücre için H yüksekliği ve L genişliği temsil etmektedir. Dikme uzunlukları l ve kalınlıkları r olarak gösterilmektedir. Hücreler arası açının yarısı yani birim hücrenin zemin ile olan açısı  $\omega$  olarak ifade edilir. Hücrelerin nispi yoğunlukları Denklem (2.5)’te verilen;

$$p^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{V_1}{V_0} \quad (2.6)$$

Formülde görüldüğü gibi geometrik ilişkiler kurularak hesaplanabilir. Burada  $p^*$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_0$  sırasıyla nispi yoğunluk, latis yapının yoğunluğu ve ana malzemenin yoğunluğunu ifade eder. latis yapının hacmini ve ana malzemenin yoğunluğunu ise sırasıyla  $v_1$  ve  $v_0$  ifade eder. Oluşturulan BCC yapıların nispi yoğunlukları Denklem (2.7)’deki,

$$\rho_1^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{V_1}{V_0} = \frac{4\pi r^2}{2l^2 \sin\omega \cos^2\omega} \quad (2.7)$$

Formülü ile hesaplanabilir. Hacim merkezli kübik-z (BCCZ) yapıların ise Denklem (2.8)’deki,

$$\rho_1^* + \rho_2^* = \frac{4\pi r^2}{2l^2 \sin\omega \cos^2\omega} + \frac{\pi r^2}{l^2 \cos^2\omega} = \frac{8\pi r^2 l + 2\pi l R^2 \sin\omega}{2l \sin\omega (\sqrt{2}l \cos\omega)^2} \quad (2.8)$$

Formülü ile hesaplanır. Burada  $\rho_1^*$  ve  $\rho_2^*$  sırasıyla BCC ve BCCZ yapıların nispi yoğunluklarını ifade eder [29].

### 2.3. Katmanlı İmalat

Katmanlı imalat yöntemi bir nesnenin belirli katman aralıkları ile birbiri üzerine eklenerek üretilmesi işlemidir [41]. Günümüzde Kİ teknolojileri ve bu teknoloji ile

yapılan üretimler yaygınlaşmıştır [42]. Bir nesnesinin belirli aralıklar ile birleştirilerek imal edilmesi yöntemi üç boyutlu üretim, hızlı prototipleme veya katmanlı, eklemeli imalat olarak da adlandırılır [43]. Kİ teknolojilerinin tasarım özgürlüğü ve üretim kolaylığı açısından sağladıkları avantajlar ile akademik, medikal, mimari, havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinin tasarım geliştirme ve endüstriyel uygulamalarında önemli araştırma konusu olmuştur.

Kİ yönteminde tasarımdan üretime olan tüm süreçler kolay, hızlı ve pratiktir. CAD programları ile bir ürünün 3 boyutlu geometrisi oluşturulur. Daha sonra katmanlı imalat için iş hazırlama yazılımlarına standard tessellation language (STL) dosya formatında gönderilerek üretim sürecine başlanır.

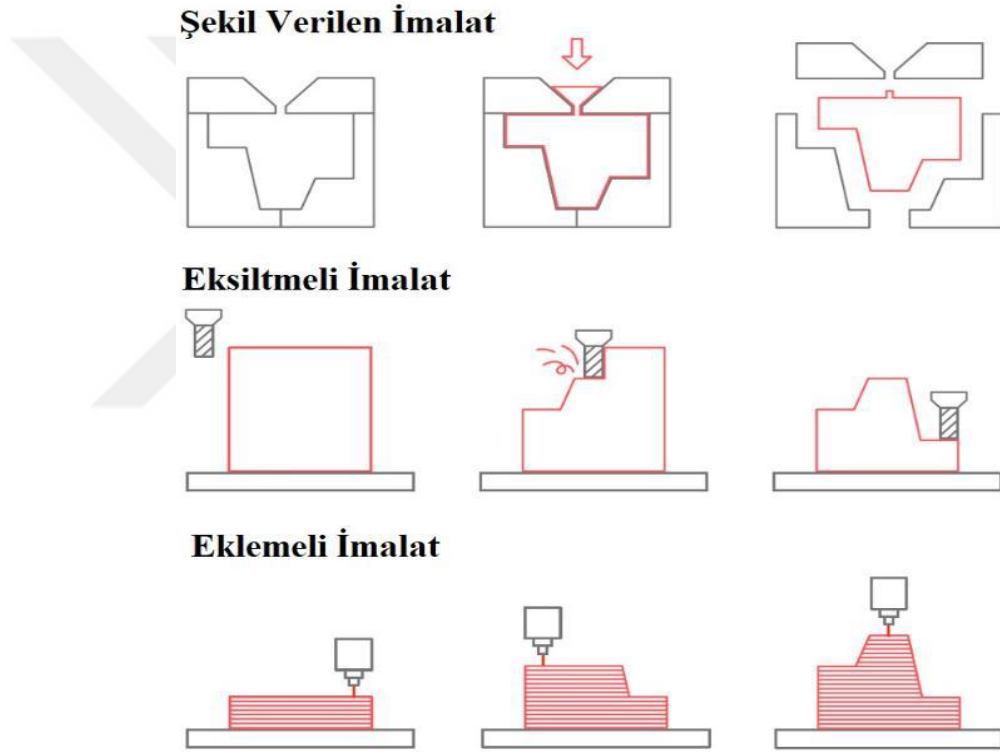
Katmanlı imalat için ilk ticari sistem olan stereolitografi sistemini üreten 3D Systems firmasının geliştirmiş dosya formatı genel kanı görüş ve CAD yazılımları tarafından desteklenmektedir [44]. Bu üretim yönteminde önemli noktalardan biri de tasarımı yapılan geometrinin STL formatına dönüştürülmesidir. İş hazırlığı aşamasında kullanıma uygun olan STL dosya formatı, üç boyutlu bir objenin yüzeylerini tarif etmek için her biri üç adet nokta ve bir adet normalden oluşan üçgenler bütünüdür. Objeye üçgenler ile ifade edildiği için üçgen sayısı arttıkça detay seviyesi de artmaktadır. STL dosyayı referans alarak başlayan işlemler üretim öncesi aşamalarında katmanlı imalat yöntemi için kullanılan bir kontrol dosyası oluşturulmaktadır. Bu dosyaların hazırlığı parça geometrisinin, üretim platformuna yerleştirilmesi ile başlamaktadır. Daha sonra üretim yapılacak katman aralığına göre geometri katmanlara ayrılır. Gerekli üretim parametrelerinin de atanması sonucunda iş hazırlık aşaması tamamlanmış olur.

Üretim öncesi hazırlıklar tamamlandıktan sonra üretim işlemi katmanlar halinde malzemelerin birleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu aşama tüm katmanlı imalat yöntemleri için ortak olmaktadır. Fakat üretim hazırlama ve üretim içerisindeki adımlar farklı yöntemler arasında değişkenlik göstermektedir [45].

Geleneksel yöntemlere göre yeni olan katmanlı imalat yöntemleri, 1980'li yılların sonunda geliştirilmeye başlandığında sadece polimer malzemelerden görsel modeller üretme kabiliyetine sahipken teknolojik gelişmeler ile günümüzde birçok metal ve polimer malzemelerden fonksiyonel parça üretimi mümkün hale gelmiştir.



Kİ yöntemi özellikle yüksek maliyetli parçaların imalatında umut veren bir yöntem olmuştur [46]. Karmaşık parçaların kısa süre içerisinde üretilmesi ve kaynakların tasarrufu katmanlı imalat teknolojisinin bazı avantajları arasında yer almaktadır [47]. Kİ yöntemiyle karmaşık parçalar geleneksel eksiltmeli ve şekil verme yöntemlerine göre daha yüksek birikim hızlarında üretilirler [48]. Bunun yanı sıra karmaşık şekle sahip ve geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi mümkün olmayan bir parça bu yöntemle üretilir [42]. Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi geleneksel yöntemlerle bir parçanın üretimi bütün bir malzemeden eksiltme veya şekil verme işlemiyle sağlanırken Kİ yönteminde malzemeler birbiri üzerinde eklenerek üretilir.



Şekil 2.3. Geleneksel üretim yöntemleri ve eklemeli imalat [49]

#### 2.4. Katmanlı İmalat Yöntemleri

Günümüzde enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması ile geleneksel yöntemlerin dışında yeni yöntemler aranmaya başlanmıştır. Bu üretim metodu ile seri üretim öncesi yapılan tasarımların ve ar-ge çalışmalarının prototip olarak üretilerek denenmesini sağlar. Örneğin yeni bir tasarımı seri üretime geçirmeden önce prototipi oluşturularak seri üretimde oluşabilecek hataların öngörülmesini sağlar. Geleneksel yöntemler üretim adetinin artması ile düşük maliyet sağlamaktadır. Bu yüzden

prototip için geleneksel yöntemler maliyet ve zaman açısından dezavantajlara sahiptir. Fakat katmanlı imalat prototip için düşük maliyet ve hızlı çözüm sunmaktadır.

Katmanlı imalat son zamanlarda endüstriyel üretim teknolojisi olarak ortaya çıkmaya başladı. Bu üretim yöntemi konusunda sınıflandırma yapan standartlara göre 7 ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Foto-polimerizasyon
- Toz yatağında birleştirme
- Bağlayıcı püskürtme
- Malzeme püskürtme
- Sac laminasyon
- Malzeme ekstrüzyonu
- Yönlendirilmiş enerji ile yığıma kategorileridir [45].

## **2.5. Tarayarak Işıklı Kütleme Tekniği ve Stereolitografi Cihazı**

StereoLithography Apparatus (SLA), diğer katmanlı imalatlar gibi tasarım verisinden doğrudan plastik parçalar üretir. SLA, Charles Hull'un çalışmasına dayalı 3D Systems tarafından 1988 yılında ticari olarak tanıtılan ilk katmanlı imalat türüdür. SLA yöntemi foto polimer sıvı reçinenin UV lazer ile katılaştırılması tekniğidir. SLA katmanlı imalatında katman kalınlığı 0,025-0,5 mm arasında değişmektedir. Her katmandan sonra vakumlu bıçak ile yeni bir kat sıvı fotopolimer kaplanır. Sonraki katman bir önceki katman üzerine oluşturularak tamamlanır. Parçanın platforma tutunabilmesi için destekler inşa edilir. İşlem sonrası destekler asıl parçadan ayrılırlar [50]. SLA, son derece yüksek doğrulukta, yüzeyi düzgün olan ayrıntılı polimer parçalar üretebilir. Reçine esaslı malzemeler, polipropilen, akrilik ve epoksi kullanılabilir. Üretim sonrasında parçaların fırınlanması ve destek yapıların temizlenmesi gerekmektedir.

## **2.6. Bağlayıcı Püskürtme Tekniği**

Bu teknoloji ilk olarak 1993 yılında Massachusetts Institute of Technology'de geliştirilen ve 1995 yılında Z Corporation tarafından patentli bir teknik olan bağlayıcı püskürtme yönteminde, toz malzeme ve sıvı bağlayıcılar kullanılır. Her katman için

toz serilir ve o katmanda katılması istenilen kısımlara sıvı bağlayıcı püskürtülür. Bağlayıcılar organik veya inorganik içerikli olabilmektedir. Üretim malzemesi plastik, seramik, metal veya cam olabilir [51].

### **2.7. Malzeme Püskürtme Tekniği**

Bu üretim tekniğinde kürlenebilen reçinelerin püskürtülerek mor ötesi ışınlar ile katılaştırılması veya ergimiş malzemelerin katmanlar halinde püskürtülerek ortam sıcaklığında katılaştırılması gibi metotları kullanılmaktadır. Malzeme püskürtme tekniği ile foto polimer, mum ve polimer malzemeler kullanılabilir. Bu yöntemin avantajları arasında birden fazla malzeme kullanılarak farklı renklerde parçaların yüksek geometrik doğrulukta üretilmesidir.

### **2.8. Saç Laminasyon Tekniği**

Saç laminasyon, levha halindeki malzemelerin kesilmesi ve birleştirilmesi tekniğine dayalı bir Kİ metodudur. Levha serilir STL datasının o katmandaki izdüşümünün sınırları kesilir ve yeni levha serilerek işlem tekrar edilir. Üretim sonrasında birbirne yapıştırılmış olan levhalardan kesilen kısım ayrılır ve ürün elde edilir. Kağıt veya plastik levhaları yapıştırmak için bağlayıcıların kullanıldığı teknik lamine nesne üretimi olarak adlandırılırken, metal levhalarda ise ultrasonik konsolidasyon olarak adlandırılır [52].

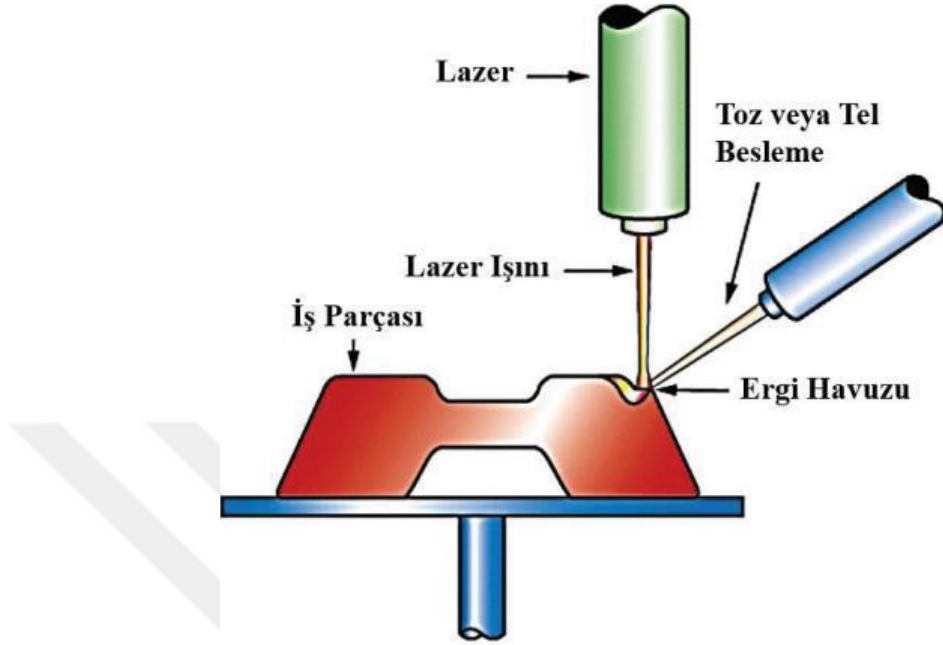
### **2.9. Malzeme Ekstrüzyonu Tekniği**

Ekstrüzyon tabanlı katmanlı imalat sistemleri, bir parçanın katmanlar halinde ekstrüde edilen bir malzeme ile üretilmesidir. Ana malzemenin eritilerek veya dökülerek birbiri üstüne inşa edilme tekniğidir. Bu üretim tekniğinin birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlar malzeme erimesine dayalı işlemler ve malzeme erimesi olmadan üretim işlemleri olarak iki ana grupta ayrılabilir [52]. Plastik, metal, çimento, gıda gibi birçok farklı malzeme ile kullanılabilir. Otomotiv, tasarım, arge, inşaat ve gıda sektörleri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

### **2.10. Yönlendirilmiş Enerji ile Yığma Tekniği**

Yönlendirilmiş enerji ile yığma, toz veya tel halinde bulunan malzemenin bir enerji kaynağı kullanılarak eritilmesi ile katmanlar halinde üretilmesi tekniğidir. Şekil 2.4'te şematığı gösterilmektedir. Yönlendirilmiş enerji ile yığma tekniği

örneklerinden olan lazer metal biriktirme (LMD) yöntemi sürekli beslenen metal tozunun lazer ile eritilerek katmanlar halinde parçanın oluşturulması işlemidir [53].



Şekil 2.4. Yönlendirilmiş lazer enerjisi ile yığıma [54]

### 2.11. Toz Yatağında Birleştirme Tekniği

Toz yatağında birleştirme tekniği, toz malzemenin katmanlar halinde eriterek veya sinterlenerek üretilmesi işlemidir. Polimer ve metal uygulamaları olan bu teknik toz partiküllerin bir platforma katmanlar halinde serilerek lazer ve benzeri bir termal kaynak ile sinterlenerek veya eritilerek üretilmesi işlemidir. Toz yatağında birleştirme tekniği örnekleri seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM), elektron ışını eritme (EBM) ve DMLS'dir [55].

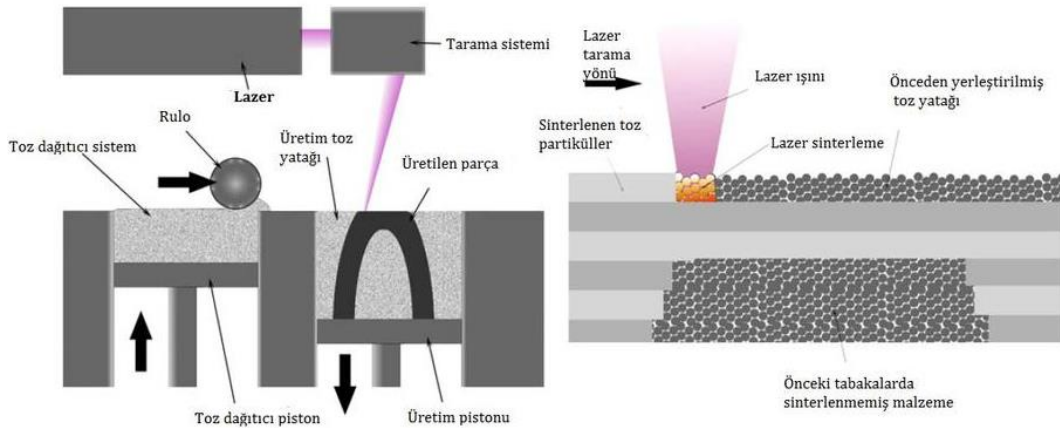
### 2.12. DMLS

DMLS, Rapid Product Innovations ve EOS GmbH tarafından ortaklaşa geliştirilen yeni bir lazer bazlı Kİ teknolojisidir. SLS, SLM veya DMLS olarak isimlendirilen toz yataklı füzyon sistemleri, bugüne kadar en çok araştırılan Kİ yöntemidir. Metalik toz, toz yatağı adı verilen bir platforma yayılır. Daha sonra lazer dilimlenmiş katmanın STL'den alınan verilerini kullanarak istenen alanı seçerek işlem parametrelerine göre tarar ve toz parçacıklarını geçerken lokal olarak eritir. Erimiş metal, lazerle olan temastan sonra katılaşır. Katılaşmadan önce eriyik havuzu metalürjik bir bağ oluşturarak taban plakasından nüfuz eder. Lazerin bir tabakaya

maruz kalmasından sonra, levha tabaka kalınlığına eşit olarak indirilir ve bir sonraki tabaka için katılaştan tabakanın üstüne toz kaplanır. Lazer bir sonraki katmanı taradığında eriyik havuzu önceden katılaştırmış katmanla birleşir. Her bir tabaka için aynı işlemi tekrarlayarak, en sonunda istenen geometri üretilir [56]. DMLS sisteminin şematik bir diyagramı Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Üretim aşaması şu şekildedir:

- Bıçağın geri dönüşünde sinterlenmiş katmana çarpmadan hareket edebilmesi için üretim platformu bir katman kalınlığında aşağı iner.
- Toz besleme haznesi yeni katmana toz sermek için bir katman kadar yükselir.
- Bıçak tozu önüne alarak üretim platformunu beslemek üzere hareket eder.
- Bu şekilde metal tozu üretim alanına homojen olarak yayılır ve bıçağın önünde kalan tozlar toz toplama bölümüne düşer.
- Lazer üretilmesi istenen geometrinin nihai katmanı STL verisine ve işlem parametresine göre sinterler.

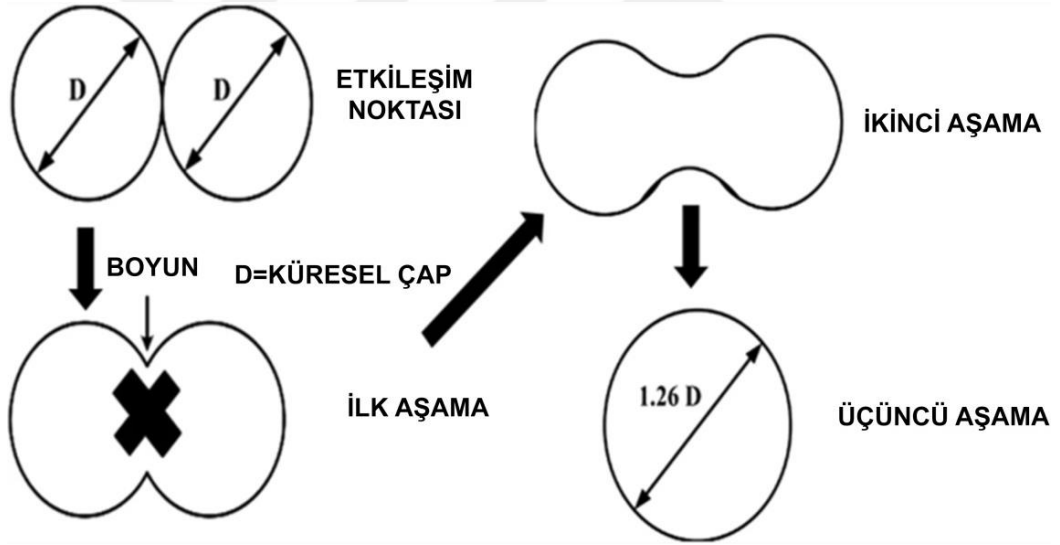
Bu işlem, üretilmesi istenilen geometri tamamlanıncaya kadar katmanlar halinde ilerler. Burada belirtilen lazer ve katmanların kalınlıkları üretim işlem parametreleri olarak geçmektedir. Üretim işlem parametreleri üretim sonrası numuneye ait termal, mekanik, geometrik vb. özelliklerini etkiler.



Şekil 2.5. DMLS sisteminin şematik diyagramı [57]

Sinterleme, termal enerji uygulayarak yoğun bir yapı oluşturmak için toz parçacıklarının bir araya getirilmesi işlemidir. Katı hal sinterlemesi, sinterlenen malzemelerin erime noktasının altında erime noktasına yakın sıcaklıklarda meydana

gelir. Sinterleme işlemi için termodinamik olay, sistemdeki yüzey serbest enerjisinin en aza indirgenmesidir. Sinterleme işleminde mikro partiküllerin birleşmesini açıklamak için birkaç model önerilmiştir. Katı hal sinterlemesinde yüzey difüzyonunu, tane sınır difüzyonunu ve partiküllerin yüzeyinden ve partiküllerin içinden hacim difüzyonunu içeren modeller baskın rol oynamaktadır [58]. Sıvı fazda sinterleme viskoz akışı, toz parçacıklarının erimesi ve yüzey gerilimi kuvvetleri ile birbirine bağlanmasını sağlayan güçlü bir mekanizma olarak kabul edilir. Sinterlemenin farklı aşamaları, Şekil 2.6'de gösterilen şema ile açıklanmaktadır. Sinterlemenin ilk aşamasında boyun oluşur. Boyun, parçacıkların yüksek yüzey enerjisine bağlı olarak aralarındaki temas ile oluşur. Bu, atomların yüzey difüzyonu ile gerçekleşir. İkinci aşama, tane sınırı difüzyonu nedeniyle ortaya çıkan gözeneklerin şeklindeki değişimdir. Son aşamada ise hacimsel ve kütle difüzyonu gerçekleşir, partiküllerin büzülmesi ve yoğunlaşması ile sonuçlanır [59].



Şekil 2.6. Sinterleme fenomeninin farklı aşamaları [59].

Kİ üretim tekniklerini kullanılmasının zaman ve maliyet tasarrufu, yüksek derecede tasarım özgürlüğü, karmaşık tasarımlar ve geleneksel üretim süreçlerine göre daha az fireli üretim gibi önemli avantajları bulunmaktadır [60].

### 2.13. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Günümüzde enerji kaynaklarının azalması ve fonksiyonel ürünlerin artması ile mekanik özellikleri yüksek olan hafif malzemelere ihtiyacı artmıştır. Bu

ihtiyaçlardan dolayı hafif ve iletken alüminyum elementi ve alaşımlar birçok sanayi sektörü ve bilimsel araştırmalar için önem kazanmaktadır.

Alüminyum yeryüzünde %8 oranında bulunmaktadır. 1886'da endüstriyel olarak Amerika ve Fransa tarafından üretilmiştir. Alüminyumun özellikleri farklı elementlerle yapılan alaşımlarda büyük ölçüde iyileştirilebilmektedir. Tablo 2.1'de %99 saflıktaki alüminyumun özellikleri verilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı gibi alüminyum mekanik özellikler açısından tek başına kullanışlı ve yeterli değildir.

Alüminyuma farklı üretim teknikleri ve kullanım alanları için nano boyuttan makro boyuta kadar değişiklikler yapılabilmektedir. Alüminyumun özelliklerinin iyileştirmek için farklı alaşımlar geliştirilmiştir. Alüminyum alaşımlandırma işleminin temel sebepleri şöyledir:

- Döküm akışkanlığını artırmak
- Sıcak yırtılmayı azaltmak
- Alaşımın korozyona dayanıklılığı, sertlik, mukavemet, işlenebilirlik ve birleştirme işlem kolaylığı sağlamak.

Tablo 2.1. Alüminyum elementinin temel fiziksel özellikleri [61]

Sembol	Al
Atom No	13
Atom Ağırlığı	26,97
Yoğunluğu	2,6978 g/cm <sup>3</sup>
Ergime Noktası	660,2 °C
Buharlaşma Noktası	2519 °C
Elektrik Direnci	26,50 nΩm
Isıl iletkenlik	237 W(mK)
Kristal Yapısı	Yüzey Merkezli Kübik
Elastiklik Modülü	6,3x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>2</sup>
Çekme Dayanımı	10,4 kg/mm <sup>2</sup>
Akma Dayanımı	2,6 kg/mm <sup>2</sup>
Vickers sertliği	167 MPa

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri belirli yüzdeler halinde yapıda bulunmaktadır. Alüminyum alaşımlarında sıkça kullanılan bakır, çinko, silisyum ve magnezyum elementlerinden de biraz bahsedilmek gerekir.

Alüminyum özelliklerini iyileştirmede bakır (Cu) kullanılmıştır. Bakır mukavemet ve sertlik artışı için kullanılmıştır. Fakat %5 oranından fazla olması durumunda işlenebilme kabiliyeti, iletkenliğini ve korozyon direncinin olumsuz etkilediği görülmüştür [61].

Silisyum (Si) elementi eriyik alüminyumun akışkanlığı artırmaktadır. Silisyum elementi alaşımda en fazla %13 oranında bulunmaktadır. Mukavemet artışı silisyumun artışı ile orantılıdır. Korozyon direnci yüksek olmasına karşın işlenebilme kabiliyeti ve ısı iletimi düşüktür. Bu özelliğinden dolayı içten yanmalı motor pistonları gibi bazı önemli parçalarda avantaj sağlamadığı görülmüştür [61].

Magnezyum elementi (Mg) ile elde edilen Al-Mg alaşımları ısı işlem uygulanabilecek alaşımlarda istenen karakteristikte bir katı eriyiğe sahiptir. %8'den fazla Mg ilave edildiğinde Al-Mg alaşımları ısı işlem uygulanarak özellikleri iyileştiği gözlemlenmiştir. Dövme alaşımlarında Mg şekil verme kolaylığı sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarında Mg elementi cüruf yapma eğilimde bir elementtir. Mg elementinin cüruf etkisini azaltmak için berilyum elementi kullanılmaktadır. Genel olarak Al-Mg alaşımları korozyona karşı direnci yüksek alaşımlardır [61].

Çinko elementi (Zn), yüksek mukavemet sahip Al-Zn alaşımlarını oluşturmaktadır. 7075 ve 7078 alaşımlarının temel elementidir. Alüminyum alaşımlarında %20'e varan miktarlarda kullanılan Çinko, haddeleme işlemi için kopma mukavemeti arttırmaktadır [61].

Alüminyum Birliği alaşımlar için genel isimlendirmeler yapmıştır. Fakat birliğin açıkladığı tanımlama sistemi kullanılmıyor önceki sistem yaygın olarak kullanılıyor. Tanımlama sisteminde alüminyum alaşımlarında ilk hane ana alaşım elementini tanımlar. Bu tanımlama sistemi Tablo 2.2'de verilmiştir [61].



Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları için sınıflandırma sistemi [62]

Al Serisi	Alaşım Elementi
1xxx	Saf Alüminyum
2xxx	Alüminyum Bakır Alaşımı (Al-Cu)
3xxx	Alüminyum Mangan (Al-Mn)
4xxx	Alüminyum Silisyum (Al-Si)
5xxx	Alüminyum Magnezyum (Al-Mg)
6xxx	Alüminyum Magnezyum Silisyum (Al-Mg-Si)
7xxx	Alüminyum Çinko Magnezyum (Al-Zn-Mg)
8xxx	Alüminyum Lityum (Al-Li)

1xxx serisi alüminyum alaşımları genellikle ticari olarak saf alüminyumlardır. Isıl işlem görmezler. Demir ve silisyumu tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Ağırıklı olarak elektrik ve kimya endüstrileri için üretilmektedirler [62].

2xxx Al-Cu alaşımları birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır. Genel olarak, Mg, Mn ve diğer alaşımlar mukavemet veya korozyon direnci için ilave edilmektedir. Bakır, alaşımda  $Al_2CuMg$  (Mg varsa) veya  $Al_2Cu$ 'da olduğu gibi birincil alaşım eklemidir. Demir bakımından zengindirler ve  $Al_7Cu_2Fe$  en yaygın olanıdır. Uzay ve uçak sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [62].

3xxx alaşımı Mn eklenmiş 1xxx serisi alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımlar tipik olarak otomotiv alüminyum radyatörlerinin imalatında kullanılır. Mn, dendrit kollarının merkezine ayrılır. Alaşım içeriğine bağlı olarak meydana gelebilecek başka bir faz  $(Mn, Fe)_3SiAl_{12}$ 'dir [62].

4xxx alaşımları mimari uygulamalarda, tank ve dövme pistonlarda kullanılır. Silisyum içeriği nedeniyle genellikle kaynak, lehimleme veya dolgu alaşımı olarak kullanılır. Kaynak tutma kabiliyeti olduğu için Kİ teknolojisinde de kullanılmaktadır. Döküm fazları Si ve katı Al-Si çözeltilisidir [62].

5xxx serisi alüminyum alaşımları kaynaklanabilir ve iyi korozyon direncine sahiptirler. Tanklar, traktör römorkları ve zırh uygulamaları için kullanılmıştır. Bu

alaşım ısıl işlem görmez. Magnezyum içeriği %3,5'ten büyük olduğunda, fazla magnezyum  $Mg_5Al_8$  olarak çökeler [62].

6xxx serisi alaşımlar çok yaygın olarak kullanılan ekstrüzyon alaşımlarındandır. Kolayca ısıl işlem görür ve iyi su verme hassasiyeti gösterir. Sertleşme çökeltisi olarak  $Mg_2Si$  kullanılarak sertleştirilir. Düşük alaşımlı Mg ve Si konsantrasyonu varsa, tüm  $Mg_2Si$  çözelti ısıl işlemi sırasında çözülebilir ve çökeltme sertleşmesi reaksiyonunda kullanılabilir. Demir açısından zengin fazlar  $Fe_3SiAl_{12}$  veya  $Fe_2Si_2Al_9$ 'dur. Mn ve Cr mevcutsa,  $Fe_3SiAl_{12}$  fazı bulunabilir [62].

7xxx serisi Cu ilaveli Al-Zn-Mg, başta savaş ve yolcu uçakları olmak üzere, uzay ve havacılık sektöründe kullanılan en yaygın alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşım, diğer alüminyum alaşımlarından daha iyi mukavemet, kırılma tokluğu ve korozyon direnci kombinasyonunu sağlamaktadır. Demir açısından zengin faz, homojenleştirilmiş yapılarda tipik olarak  $Fe_3SiAl_{12}$  ve dökme yapılarda  $Al_7Cu_2Fe$ 'dir. Cr varsa, sıcak işlem sırasında yeniden kristalleşmeyi engelleyen ince bir dispersoid oluşturur. Yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırmak için Zr gibi başka dispersoidler de kullanılır [62].

Metal katmanlı imalat için uygun maliyet açısından Al'nin önemli bir yeri vardır. Örneğin Al'in işlenmesi Ni gibi metallere göre nispeten kolaydır ve Al parçalarının maliyetleri daha düşüktür. Al alaşımları KI için yüksek termal iletkenliği ve termal olarak indüklenen gerilmeleri azaltmasından dolayı destek yapılarına duyulan ihtiyacı da azaltır ve yüksek termal iletkenliği sayesinde daha yüksek işlem hızları sağlar [56]. AlSi10Mg genellikle döküm metodu için kullanılan bir alüminyum alaşımıdır [63]. AlSi10Mg alaşımı kimyasal bileşimi ötektik bileşime yakın olduğu için yüksek akışkanlığa ve düşük katılaşma büzülmesine sahiptir.

DMLS yöntemi için alüminyum alaşımları içinde en çok AlSi10Mg alaşımı tercih edilmektedir. DMLS ile üretilen AlSi10Mg parçaları, havacılık, otomotiv, denizcilik ve medikal endüstrilerin yanı sıra, spesifik tasarımlara ihtiyaç duyulan çok çeşitli uygulamalarda prototip üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [64]. Bu alaşımdaki Mg elementi çökeltme sertleşmesini arttırırken Si elementi mukavemet ve akışkanlığı arttırmaktadır.

Füzyona dayalı Kİ işlemleri için bir malzemenin uygulanabilirliği genellikle malzemenin kaynak kabiliyeti ile belirlenir. Yani kullanılacak olan malzemede kaynak işlemi ne kadar kolay olursa Kİ teknolojisi ile işlemesi o kadar uygun ve kolay olmaktadır. Alüminyum alaşımları Kİ ile üretilebilmesi için bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Örneğin Al 7xxx serisi yüksek performanslı uçucu elementler içeren Al alaşımları makinenin sistemlerine zarar verebileceği veya malzemede poroziteye sebep olabileceği için bu teknolojide kullanımları zor ve uygun değildir [56]. Ayrıca yüksek yansıtıcılıya sahip olan Al ve alaşımları lazer ışınlarını yansıtabileceği için Kİ ile kullanımı uygun olmayabilir [65]. Bu sebeplerden dolayı Al alaşımları ile yapılan araştırmalar çelik, titanyum gibi metallere göre azdır ve DMLS metodu ile alüminyum alaşımlı latis yapıların üzerine çok fazla araştırma yoktur [66].

### 3. MATERYAL VE METOT

Tezin bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan materyal ve metotlar anlatıldı. Bu tez çalışmasında tasarım, malzeme özelliklerinin deneysel çalışmaları, iş hazırlama, üretim, ölçüm, görüntüleme sistemleri ve yazılımlar kullanılmıştır. Kullanılan yazılım ve sistemlerin tamamı için Alüminyum Test Eğitim Ve Araştırma Merkezi'nin altyapısından faydalanılmıştır. Kullanılan cihazlar ve yazılımlara ait bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan cihazlar ve yazılımlar

Kullanım amacı	Kullanılan yazılım/cihaz
CAD	Spaceclaim
STL İnceleme ve data ölçümleri	Netfabb Studio Professional 4.9
STL hazırlama ve CLI formatına çevirme	Materialise Magics 20.03
Katmanlara ayırma	EOS RP Tools 6.2
Üretime gönderme ve parametre atama	EOSPrint 1.5
3D katmanlı imalat makinesi	EOS M290
Hassas tartı cihazı	Precisa BJ 1200C
SEM	HITACHI SU3500
EDS	Oxford XACT
Optik emisyon spektrometresi	ARL™ 3460 OES
Basma test cihazı	ALŞA 100kN®
Sertlik ölçüm test cihazı	SHIMADZU G21D

#### 3.1. Spektrometre Analizi

Üretilen gözenekli yapıların elementler analizi Şekil 3.1'de görülen ARL™ 3460 OES optik emisyon spektrometresi kullanılarak gerçekleştirildi. Analiz sonuçları

üretimde kullanılan tozun temin edildiği EOS firmasının verileri ile kıyaslamak için kullanıldı.

Optik emisyon spektrometresi (OES) genellikle metallerin üzerindeki sabit bir noktayı uyararak kimyasal içeriğini belirlenmesinde ve karakterizasyonunda kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, elementlerin dağlamada farklı frekanslarda karakteristik spektral çizgiler yayması prensibine dayanmaktadır. OES'ler metal yüzeyin uyarılması için iki elektrot arasında gerçekleştirilen akım darbesi veya elektrik boşalımı sağlar. Elde edilen spektral çizgileri birbirlerinden ayırt edilebilmesi için ızgara reflektör kullanılır. Çizgilerin şiddetleri sensörler ile ölçülerek numune içerisinde bulunan elementler ve bu elementlerin yüzde miktarları tespit edilir.



Şekil 3.1. ARL™ 3460 optik emisyon spektrometresi

### 3.2. AlSi10Mg Tozu

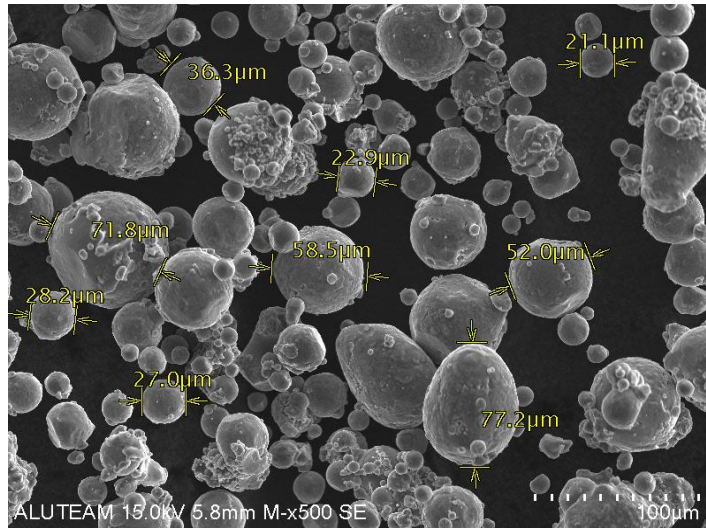
EOS M290 DMLS cihazında deney numunelerinin üretimi için EOS firmasının gaz atomizasyonu yöntemi ile ürettiği AlSi10Mg tozunun boyut analizi, yoğunluk ölçümü, kimyasal bileşimi ve SEM analizlerinin incelemesi yapıldı.

Tablo 3.2’de deneyde kullanılan AlSi10Mg tozunun EOS tarafından yapılan partikül test analizi görülmektedir. Tozun temin edildiği firmanın yapmış olduğu analiz sonucunda tozların boyutsal olarak 90 µm’den küçük olduğu ve kümülatif boyut dağılımında %10’da 28,92 µm, %50’de 47,2 µm ve %90’da 72,86 µm olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.2. Toz Partikül Analizi

Özellik	Test Metodu	Birim	Sonuç
d10	İSO 13320	µm	28,92
d50	İSO 13320	µm	47,2
d90	İSO 13320	µm	72,86
90 µm’den büyük Partiküller	ASTM B214	%	0.0

Şekil 3.2’de çalışmada kullanılacak olan toza ait SEM görüntüsü bulunmaktadır. Resimde de görüldüğü gibi tozlar küresel geometridedirler ve firmanın toz boyut analizine uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. Toz SEM görüntüsü

Tablo 3.3’de tozun temin edildiği firmanın ASTM B212 standardına göre yapmış olduğu yoğunluk analizi sonucu verilmiştir. Analiz sonucunda görünür yoğunluk 1,32 g/cm<sup>3</sup>’dür.

Tablo 3.3. Toz Yoğunluğu

Özellik	Test Metodu	Birim	Sonuç
Görünür Yoğunluk	ASTM B212	g/cm <sup>3</sup>	1,32

Tablo 3.4’de AlSi10Mg tozunun kimyasal bileşimi verilmiştir. Malzemenin DIN EN 1706 standarttı, EOS firmasına ait analiz ve ARL™ 3460 OES Spektrometresi ile yapılan analiz verilmiştir. EOS firmasının analizi ve çalışmada yapılan analizlerin yakın olduğu ve standartlara uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3.4. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi

Elementler	DIN EN 1706	EOS firmasının toz raporu	ARL™ 3460 OES Spektrometresi
Al (%)	BALANS	BALANS	BALANS
Si (%)	9 – 11	9,8	9,7
Fe (%)	Max. 0,55	0,14	0,18
Cu (%)	Max. 0,05	0,02	<0,01
Mn (%)	Max. 0,45	<0,01	<0,01
Mg (%)	0,2 – 0,45	0,36	0,35
Ni (%)	Max. 0,05	0,01	0,01
Zn (%)	Max. 0,1	<0,01	<0,01
Pb (%)	Max. 0,05	<0,01	<0,01
Sn (%)	Max. 0,05	<0,01	<0,01
Ti (%)	Max. 0,15	0,01	<0,01

Tablo 3.5’te AlSi10Mg malzemesi için yoğunluk, mukavemet ve elastik modülü için verilen değerler gösterilmektedir. Parça yoğunluğu 2,67 g/cm<sup>3</sup>, akma mukavemeti 240 MPa ve elastik modülü 70 GPa’dır [67].

Tablo 3.5. AlSi10Mg Parça Yoğunluğu [67]

Özellik	Test Metodu	Birim	Sonuç
Parça Yoğunluğu	İSO 3369	g/cm <sup>3</sup>	2,67
Akma Mukavemeti	ISO 6892-1:2009	MPa	240±10

Tablo 3.5.(Devam) AlSi10Mg Parça Yoğunluğu [67]

Özellik	Test Metodu	Birim	Sonuç
Elastik Modülü	-	GPa	70±10

### 3.3. Materialise Magics

Üretim öncesinde STL datanın hatalarının düzenlenmesi ve destek yapıların hazırlanarak datanın SLI (Slice Layer Interface) ve CLI (Common Layer Interface) formatına dönüştürmek için Materialise Magics programı kullanıldı. Programdan üretimin yapılacağı makine modeli ve üretim malzemesi (AlSi10Mg 30µm, EOS M290) seçilerek STL data programa yüklendi. Parçanın en uygun konumu belirlenerek zeminden 4 mm boşluk bırakılarak konumlandırıldı. Konumlandırma işleminin ardından destek yapılar atıldı. Bu sistemlerde en yaygın kullanılan block tip destek yapıları uygulandı. Parça çıktısı olarak STL, destek yapısı olarak CLI uzantısı alındı.

### 3.4. EOS RP TOOLS

Üretim öncesinde hazırlanan STL dataların katmanlara ayırmak ve katman kontrolü yapmak için EOS RP Tools programı kullanıldı. Programda önceden kaydedilen STL ve CLI formatındaki datalar katmanlara ayrılarak SLI formatına dönüştürüldü. SLI formatı katmanlara ayrılmış üretim datasını ifade etmektedir.

### 3.5. EOS PRINT

Bu program katmalara bölünmüş olan data üzerine üretim işlem parametrelerinin atandığı ve hazırlanan verilerin makineye gönderildiği son aşama olarak kullanılmaktadır. Üretimlerin bilgisayar ortamındaki son işlem olarak CAM amacıyla EOS Print kullanıldı.

### 3.6. EOS M290

Bu tez çalışmasında Şekil 3.3'te gösterilen EOS M290 cihazı kullanılmıştır. Üretim hacmi 250 x 250 x 325 mm<sup>3</sup> olan EOS M290, metal parçaların doğrudan CAD verilerinden hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde DMLS yöntemi ile üretilmesini sağlar. EOS M290'a ait lazer gücü, tarama hızı ve lazer çapı Tablo 3.6'da verilmiştir.



Tablo 3.6. EOS M290 Teknik Özellikleri [68]

Üretim Alanı	250x250x325 mm
Lazer gücü	400 W
Tarama hızı	Max 7 m/s <sup>2</sup>
Odak çapı	100 mikron
AlSi10Mg üretim katman kalınlığı	30 mikron



Şekil 3.3. EOS M290 makinesi

### 3.7. Kütle Ölçümü

Üretilen numunelerin kütleleri Şekil 3.4.'te gösterilen 0,01 g hassasiyetli Precisa BJ1200 tartısı ile yapılmıştır. Yoğunluk hesapları Denklem (5.1)'de verilen;

$$P = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

Formül ile yapılmıştır. Burada gösterilen P yoğunluk ( $g/cm^3$ ), m kütle (g) ve v hacim ( $cm^3$ )'tür.



Şekil 3.4. Hassas tartım cihazı

### 3.8. SEM/EDS Analizi

Üretilen gözenekli yapıların mikro yapısal ve elementel analizleri Şekil 3.5'te görülen HITACHI SU3500 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Oxford XACT enerji dağılım spektrometresi (EDS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. SEM/EDS cihazı

Elektron mikroskopları yüksek enerjili elektronları numune yüzeyi ile etkileşimi sonucunda elde edilen verilerin görüntülenmesi prensibiyle çalışır. Elektron mikroskoplarında elektronların salınışı volfram flamanın ısıtılması ile sağlanmaktadır [69].

Elektron mikroskopları optik kolon, numune haznesi, görüntü işleme ve EDS bağlantısı olmak üzere dört temel kısımdan oluşur. Taramalı elektron mikroskobu ile ahşap, polimer, cam ve metal gibi birçok malzemenin analizi yapılabilmektedir.

### 3.9. Sertlik Testi

Üretilen gözenekli yapıların sertlikleri Vickers sertlik ölçme yöntemi ile ölçülmüştür. Vickers sertlik ölçme yöntemi parçanın yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında belirli bir süre ile uygulanmasından sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesi işlemidir. Sertlik ölçümleri Shimadzu G21D marka Vickers mikrosertlik cihazında 1,961 N yük altında 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Her numune için verilen sertlik değeri 6 ayrı izin ortalamasıdır. Şekil 3.6'da Shimadzu marka sertlik cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Shimadzu sertlik cihazı

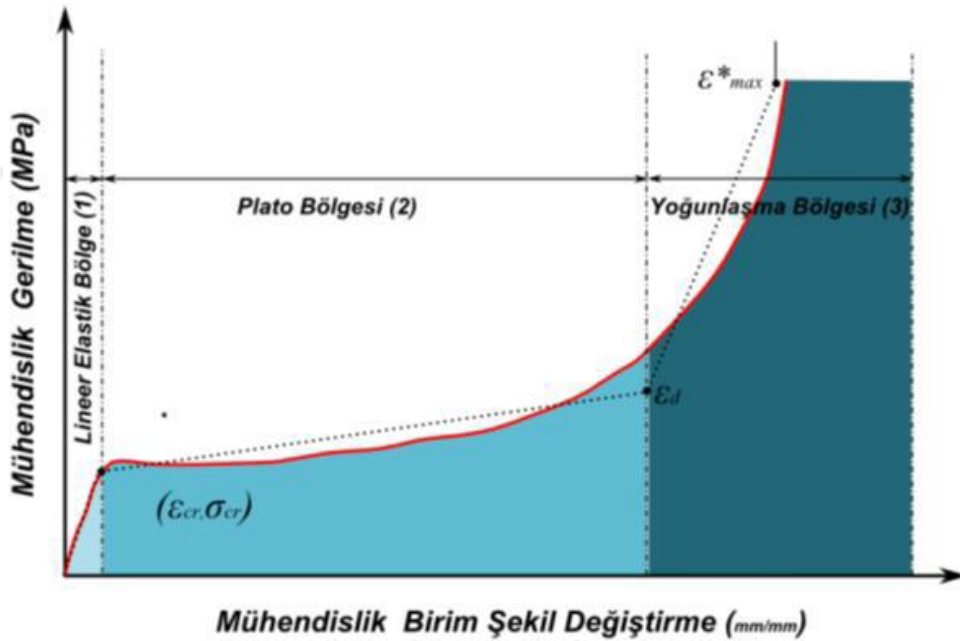
### 3.10. Basma Testi

Gözenekli ve latis yapılar basma etkisi altında non-lineer deformasyon davranışları sergilemektedirler. Gözenekli yapılar yarı statik yük altında Şekil 3.7'de verilen gerilme-gerinim grafiğinde de görüldüğü gibi lineer elastik bölge, çökme (plato)

bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç farklı deformasyon davranışı sergilerler [70].

Lineer elastik bölge gözenekli yapılar için elastik deformasyonun olduğu kısımdır. Bu kısımda hücrelerde elastik deformasyon oluşur. İkinci bölge olan çökme deformasyonu ise elastik bölgede deforme olmamış kısımların diğer kısımlara katlanarak kademeli bir şekilde ilerlediği bölgedir. Bu bölgede gözlemlenen gerilme miktarındaki değişime oranla birim şekil değiştirmenin arttığı bölgedir. Bu sebeple gerilme–gerinim grafiğinin bu bölgesinde yataya yakın bir eğri oluşmaktadır.

Yoğunlaşma bölgesinde ise gözeneklerin azalması ve hücre boşluklarının kırılarak kaybolması ile gerilme-gerinim grafiğinin bu bölgesinde yükselme hareketi görülür [70].



Şekil 3.7. Gözenekli yapıların deformasyon bölgeleri [70]

Üretilen gözenekli yapıların hücre boyutlarında ve farklı tip birim hücre tasarımların yarı statik yüklemeye koşullarında sergiledikleri mekanik özellikler incelenmiştir.

Basma deneylerini Şekil 3.8’de gösterilen ALŞA 100kN® test cihazı ile 1 mm/dk basma hızı ile gerçekleştirildi. Basma testi için 100 kN üst kuvvet sınırı, numunelerin boyut ve hacim oranı için bir sınır oluşturmaktadır. Basma testi, Apple 6S cep

telefonu kamerası tarafından kaydedilmiştir. Video çekimleri kullanılarak basma testinin aşamaları incelenmiştir.



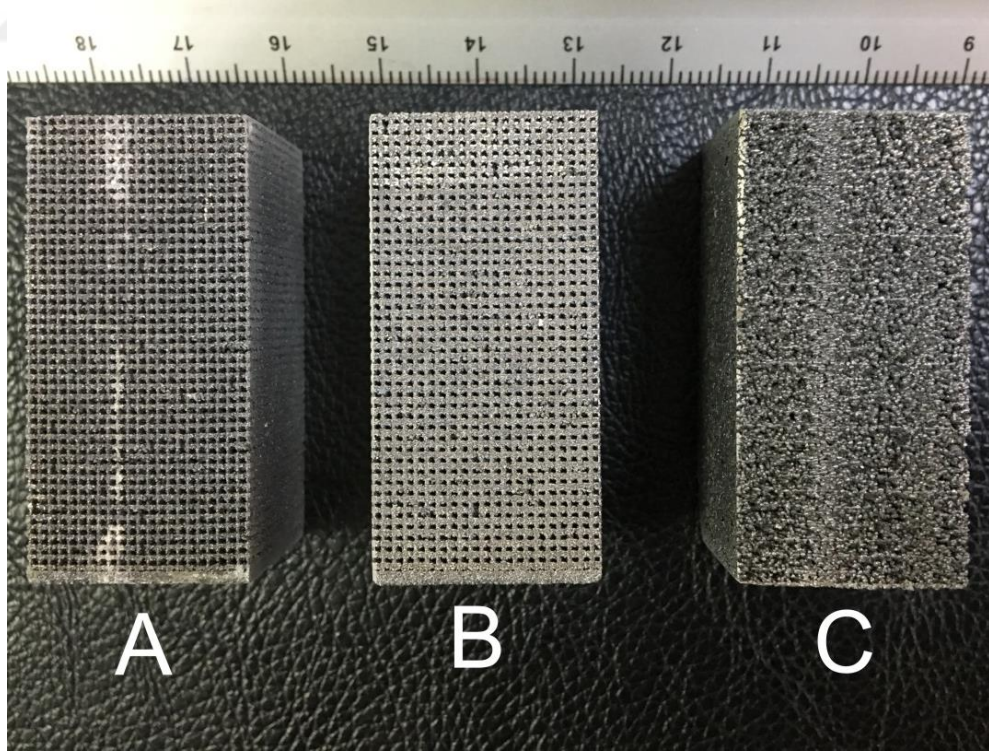
Şekil 3.8. ALŞA 100kN test cihazı



#### 4. DENEY NUMUNELERİ

Tezin bu bölümünde EOS M290 makinesinin lazer tarama aralığı değiştirilerek üretilen boşluklu yapı ve Spaceclaim programı ile farklı tip latis yapıları tasarımları hakkında bilgi verildi.

Spaceclaim programında tasarlanan latis yapıların üretim platformundan çıkarılabilmesi ve platforma tutunabilmesi için zeminlerine 1 mm kalınlık verilerek tasarlanmıştır. Latis yapıların üretiminde EOS M290 DMLS cihazı ile AlSi10Mg tozunu sinterlemesinde EOS firması tarafından tavsiye edilen üretim lazer parametreleri kullanıldı. Boşluklu yapının üretilmesi için tarama aralığı değiştirilmiştir. Lazer gücü (W), tarama hızı (mm/s), tarama aralığı (mm), lazer enerji yoğunluğu ( $\text{j/mm}^3$ ) ve katman kalınlığı değerleri Tablo 4.1’de verilmektedir. Üretilen numunelere ait görüntüler Şekil 4.1’de verilmiştir.



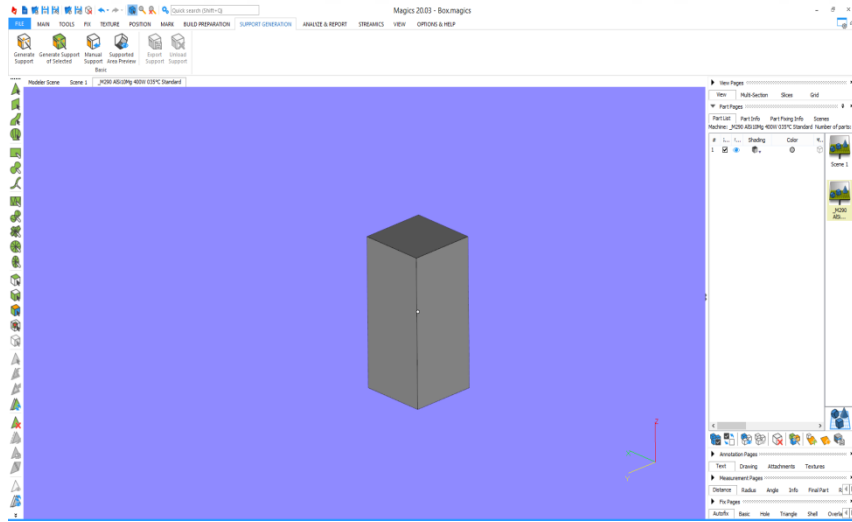
Şekil 4.1. Üretilen farklı tip gözenekli numuneler a) C1, b) D2, c) T1

Tablo 4.1. DMLS M290 cihazı AlSi10Mg için üretim parametresi

	Lazer Hızı (mm/s)	Lazer Gücü (W)	Tarama aralığı (mm)	Katman Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Enerji Yoğunluğu ( $\text{j}/\text{mm}^3$ )
Standart Parametresi	1300	370	0,19	0,03	49,93
Tarama Aralığı	1300	370	2	0,03	4,74

#### 4.1. Tarama Aralığı Değiştirilerek Üretilen Boşluklu Yapı

Numune Materialise Magics programından  $20*20*40 \text{ mm}^3$  ölçülerinde tasarlanmıştır. EOS Print programında tarama aralığı değiştirilerek ve sınır parametresi iptal edilerek üretildi. Numunelere üretimden sonra mikro sertlik, SEM/EDS ve basma testleri gerçekleştirildi. Farklı üretim parametresi ile üretilen boşluklu yapı T1 olarak isimlendirildi.

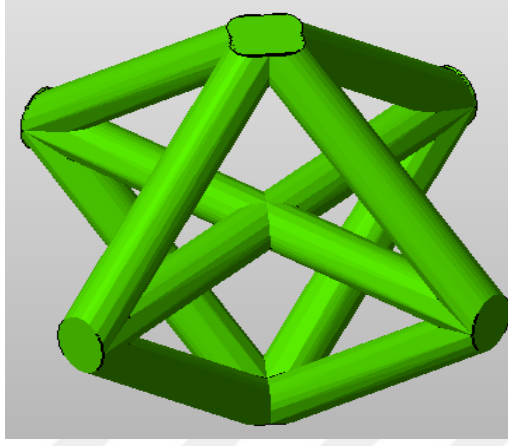


Şekil 4.2. T1 gözenekli yapının tasarımı

Şekil 4.2’de Tarama aralığı değiştirilerek üretilen boşluklu yapının Materialise Magics programında yapılan tasarımı gösterilmiştir. Tasarım Materialise Magics programının ara yüzünde bulunan create modülünden katı model olarak tasarlanmıştır.

## 4.2. Double Pyramid Lattice with Cross Yapı

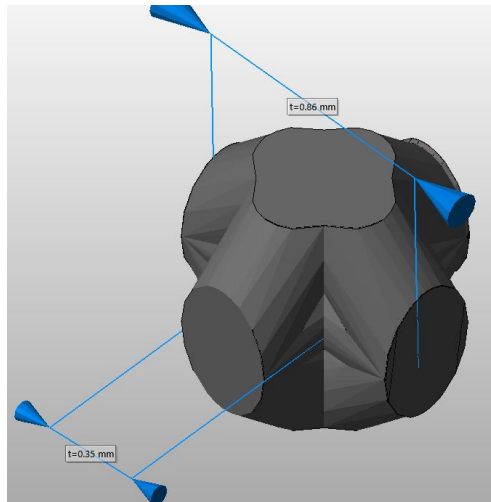
Farklı Double Pyramid Lattice With Cross tip hücre ölçülerine sahip numuneler Spaceclaim programında tasarlanmıştır.



Şekil 4.3. Double pyramid lattice with cross latis birim hücresi

Şekil 4.3'te 12 dikmeden oluşan double pyramid lattice with cross yapısına ait birim hücre örneği gösterilmektedir.

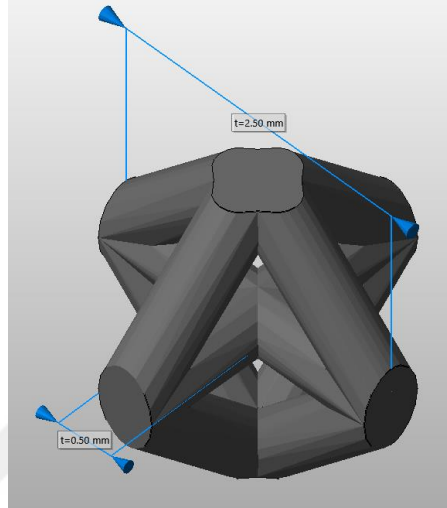
Spaceclaim programında tasarlanan double pyramid lattice with cross latisler yapılarında farklı tasarım parametreleri kullanıldı. Farklı tasarım parametrelerinde üretilen Double Pyramid Lattice With Cross latisler C1,C2 olarak isimlendirildi.



Şekil 4.4. C1 latis yapının birim hücresi

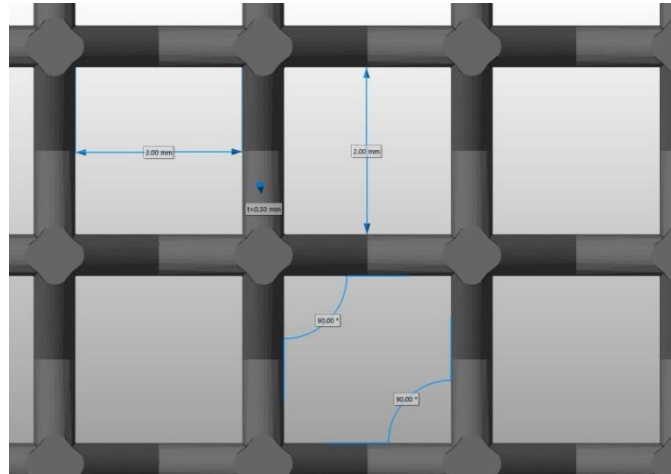


Şekil 4.4'te gösterilen birim hücre  $20*20*40 \text{ mm}^3$  ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 0,86 mm uzunlukta ve 0,35 mm kalınlıktadır. Tasarım Spaceclaim programından STL uzantısı ile kaydedildi. Alınan STL data Materialise Magics programında tasarımın alt zeminine destek yapı eklenerek üretime hazırlandı.



Şekil 4.5. C2 latis yapının birim hücresi

Şekil 4.5.'de gösterilen birim hücre  $20*20*30 \text{ mm}^3$  ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 2,5 mm uzunlukta ve 0,5 mm kalınlıktadır. Tasarım Spaceclaim programından STL uzantısı ile alındı.

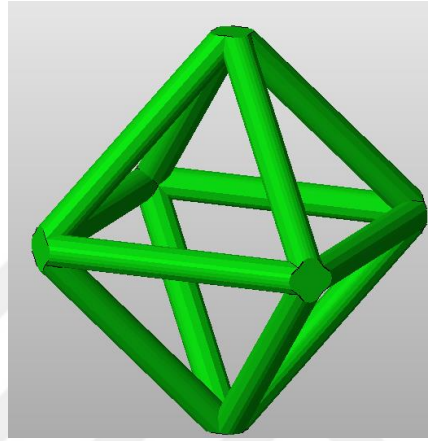


Şekil 4.6. C2 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler

Şekil 4.6’da C2 tasarımının STL dosyasından alınan ölçüler verildi. Birim hücrelerin arasında bulunan kare boşlukların boyları 2 mm, birleşim açıları  $90^0$  ve duvar kalınlıkları 0,5 mm olarak ölçüldü.

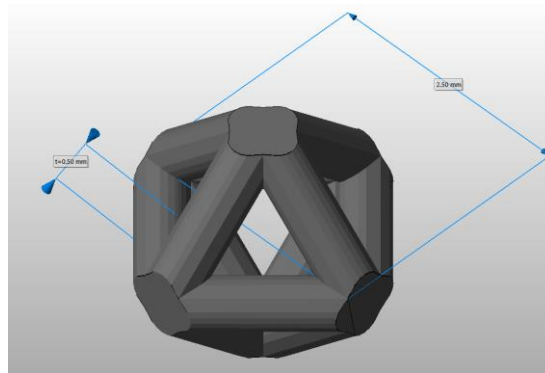
### 4.3. Double Pyramid Lattice with Lateral Yapı

Double pyramid lattice with lateral tip yapı numuneleri Spaceclaim programında tasarlanmıştır.



Şekil 4.7. Double pyramid lattice with lateral birim hücresi

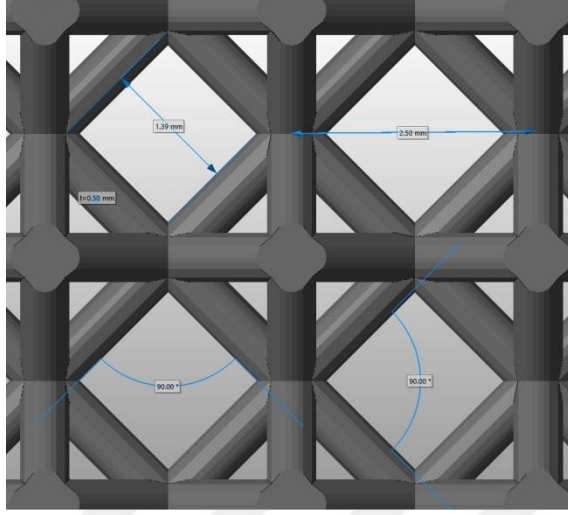
Şekil 4.7’de 12 dikmeden oluşan double pyramid lattice with lateral yapısına ait birim hücre örneği gösterilmektedir. Üretilen double pyramid lattice with lateral yapı “L1” olarak isimlendirildi.



Şekil 4.8. L1 latis yapının birim hücresi

Şekil 4.8’de gösterilen birim hücre  $20*20*30 \text{ mm}^3$  ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 2,5 mm uzunlukta ve 0,5 mm kalınlıktadır. Tasarım

Spaceclaim programından STL uzantısı ile alındı. Alınan STL data Materialise Magics programında tasarımın alt zeminine destek yapı eklenerek üretime hazırlandı.

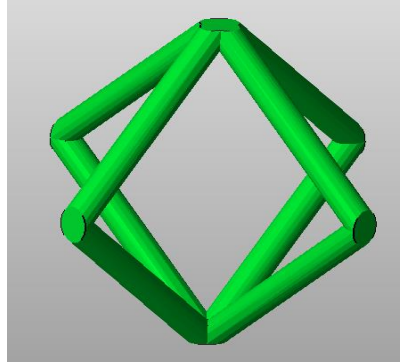


Şekil 4.9. L1 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler

Şekil 4.9’da L1 tasarımının STL dosyasından alınan ölçüler verildi. Birim hücrelerin arasında bulunan kare boşlukların boyları 1,39 mm, birleşim açıları  $90^0$ , merkezler arası mesafe 2,5 mm ve duvar kalınlıkları 0,5 mm olarak ölçüldü.

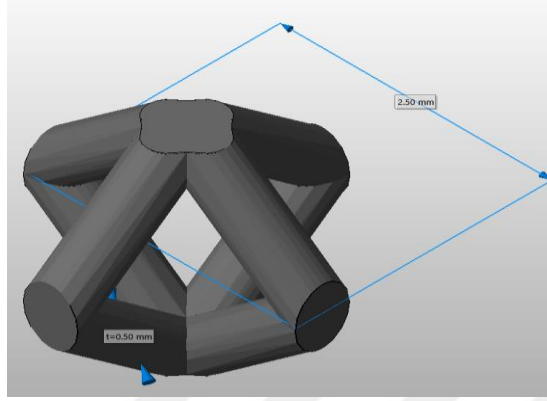
#### 4.4. Double Pyramid Lattice without The Lateral

Double pyramid lattice without the lateral tip yapı numuneleri Spaceclaim programında tasarlanmıştır.



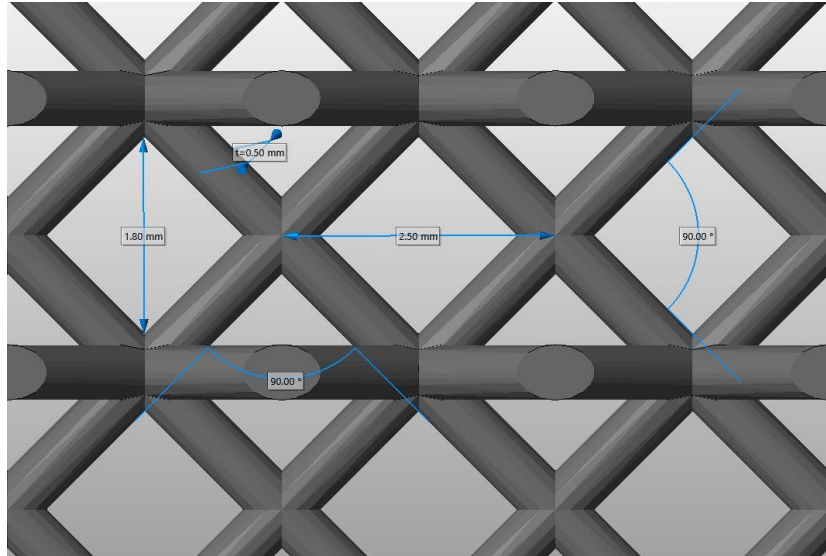
Şekil 4.10. Double pyramid lattice without the lateral birim hücresi

Şekil 4.10’da 8 dikmeden oluşan Double pyramid lattice without the lateral yapısına ait birim hücre örneği gösterilmektedir. Üretilen double pyramid lattice with lateral yapı “P1” olarak isimlendirildi



Şekil 4.11. P1 latis yapının birim hücresi

Şekil 4.11’de birim hücre  $20*20*30 \text{ mm}^3$  ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 2,5 mm uzunlukta ve 0,5 mm kalınlıktadır. Tasarım Spaceclaim programından STL uzantısı ile alındı. Alınan STL data Materialise Magics programında tasarımın alt zeminine destek yapı eklenerek üretime hazırlandı.

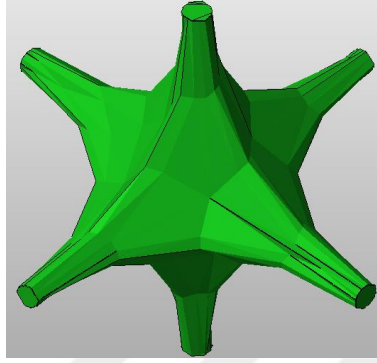


Şekil 4.12. P1 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler

Şekil 4.12’de P1 latis tasarımının STL datası üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçları verildi. Birim hücrelerin arasında bulunan kare boşlukların boyları 1,8 mm, birleşim açıları  $90^0$ , merkezler arası mesafe 2,5 mm ve duvar kalınlıkları 0,5 mm olarak ölçüldü.

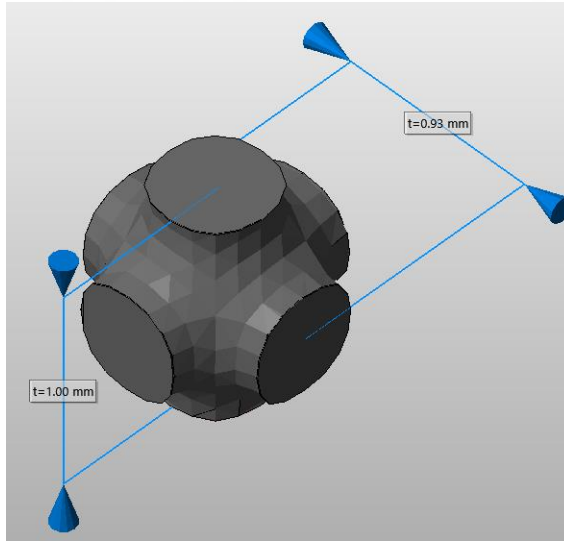
#### 4.5. Dimensional Lattice Infill Pattern Yapı

Spaceclaim programında 3-dimensional lattice infill pattern tip birim hücresi ile iki farklı latis yapı tasarlanmıştır.



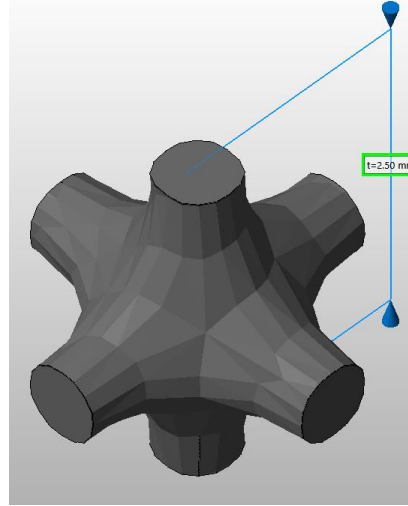
Şekil 4.13. 3-dimensional lattice infill pattern birim hücresi

Şekil 4.13'te 6 dikmeden oluşan 3-dimensional lattice infill pattern yapısına ait birim hücre örneği gösterilmektedir. Farklı tasarım parametrelerinde üretilen 3-dimensional lattice infill pattern latisler "D1 ve D2" olarak isimlendirildi.



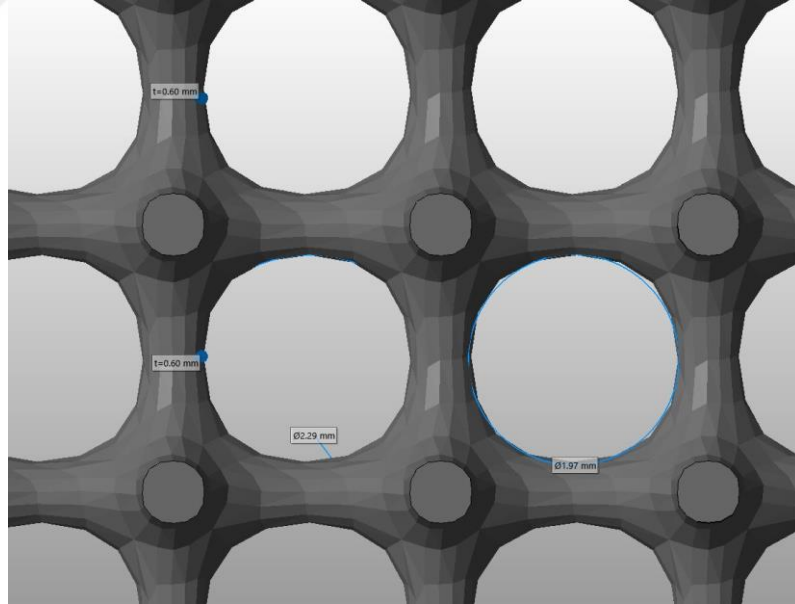
Şekil 4.14. D1 latis yapısının birim hücresi

Şekil 4.14'te gösterilen birim hücre  $20*20*40$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 1 mm uzunlukta ve 0,93 mm kalınlıktadır. Tasarım Spaceclaim programından STL uzantısı ile kaydedildi. Alınan STL data Materialise Magics programında tasarımın alt zeminine destek yapı eklenerek üretime hazırlandı.



Şekil 4.15. D2 latis yapının birim hücresi

Şekil 4.15’de gösterilen birim hücre  $20*20*30 \text{ mm}^3$  ölçülerinde bir geometri için kullanıldı. Her bir birim hücre 2,5 mm uzunlukta ve 0,5 mm kalınlıktadır. Tasarım Spaceclaim programından STL uzantısı ile kaydedildi. Alınan STL data Materialise Magics programında tasarımın alt zeminine destek yapı eklenerek üretime hazırlandı.



Şekil 4.16. D2 latis yapının STL dosyasından alınan ölçüler

Şekil 4.16’da D2 latis tasarımının STL datası üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçları verildi. Birim hücrelerin arasında bulunan dairesel boşlukların boyları ortalama 2 mm, merkezler arası mesafe 2,5 mm ve duvar kalınlıkları 0,6 mm olarak ölçüldü.

Tablo 4.2. Latis yapıların tasarım parametreleri

	Taban kalınlığı (mm)	Doldurma oranı (%)	Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Yönelme ekseni
C1	1	100	0,86	0,35	Z
C2	1	24,5	2,5	0,5	Z
L1	1	26,7	2,5	0,5	Z
P1	1	17,8	2,5	0,5	Z
D1	1	100	0,5	0,4	Z
D2	1	24,5	2	0,5	Z

Spaceclaim programında tasarlanan latis yapılarda farklı tasarım parametreleri taban kalınlığı (mm), doldurma oranı (%), uzunluk (mm), kalınlık (mm) ve yönelme eksenlerine ait bilgiler Tablo 4.2.'de verildi. Latis yoğunluğu, teorik ağırlık değeri ve porozite oranları Tablo 4.3.'te verildi. Tasarlanan latislerin STL hacimleri üretim malzemesi olan AlSi10Mg malzemesinin yoğunluğuna bölünerek tasarımın beklenen ağırlığı hesaplandı. AlSi10Mg malzemesinin yoğunluğu Tablo 3.5'te verilen 2,67 g/cm<sup>3</sup> olarak alındı.

Tablo 4.3. Latislerin tasarım verilerine göre hacim, ağırlık, yoğunluk ve poroziteleri

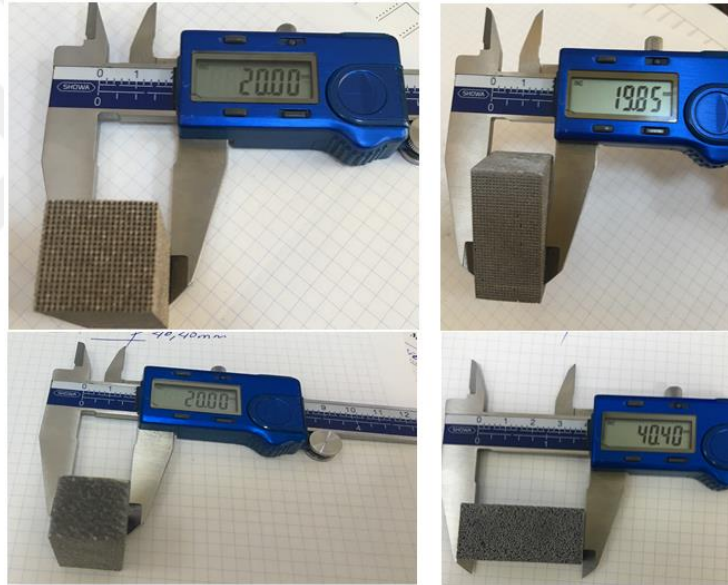
	Tasarım hacmi (cm <sup>3</sup> )	Tasarımın teorik kütlesi (g)	Tasarımın Katı hacmi (cm <sup>3</sup> )	Tasarlanan Latis yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	Porozite Oranı
C1	8,36	22,32	16	1,395	0,48
C2	2,51	6,70	12	0,56	0,78
L1	2,73	7,29	12	0,61	0,77
P1	2,09	5,58	12	0,46	0,83
D1	8,81	23,52	16	1,47	0,45
D2	2,56	6,67	12	0,56	0,79
T1	16	42,72	16	2,67	0

## 5. DENEYSEL BULGULAR

Tezin bu bölümünde deneysel çalışmaların sonuçları ve incelemeleri yapıldı.

### 5.1. Kütle Ölçümleri ve Yoğunluk Hesaplamaları

Üretilen numunelerin kütleleri 0,01 g hassas tartı ile ölçüldü. Ölçüm sonuçları Tablo 5.1’de verildi. Serbest olan tozların giderebilmesi için ölçümlerden önce ultrasonik yıkama makinası kullanıldı. Üretilen latis yapıların boyut ölçümleri 0,02 mm hassasiyette kumpas ile yapıldı. Şekil 5.1’de boyut ölçümünden örnekler verildi.



Şekil 5.1. Kumpas ile boyut ölçümü

Tablo 5.1’de latis numunelerin üretim sonrası ağırlık, hacim ve yoğunluk değerleri verildi. Numunelerinin üretim sonrası ve teorik verilerin yakın olduğu görülmektedir. Fakat üretilen numunelerin ağırlıkları teorik verilere göre %10-15 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum numunelerin içerisinde serbest halde kalan tozlar ile sinterleme esnasında hücre duvarlarına kısmi olarak birleşmiş toz tanelerinin sebep olduğu tespit edildi. Literatür incelendiğinde benzer sonuçlar görülmektedir.

T1 numunesinde hesaplanan ağırlık ile numune ağırlığının farklı olmasında kullanılan işlem parametresi sebep oldu. Şekil 4.1.c’de görülen T1 numunesinde



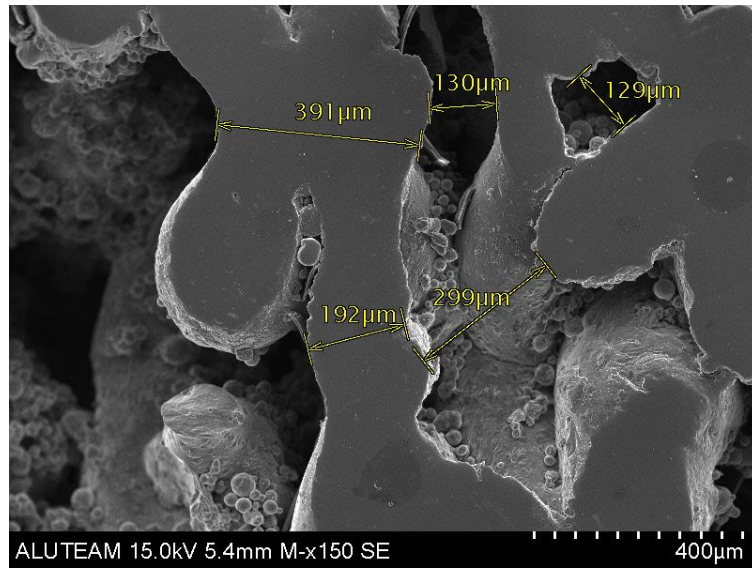
bulunan gözeneklerin oluşumu kullanılan tarama aralığının normal üretimlere göre yaklaşık 10 kat fazla olması ile sağlandı.

Tablo 5.1. Üretim sonrası kütle ve yoğunluk değerleri

	T1	C1	C2	L1	P1	D1	D2
Ağırlık (g)	24,8	25,4	7,49	7,39	6,31	24,9	7,02
Latis Hacmi (cm <sup>3</sup> )	16,08	16,12	12,70	12,51	12,71	16,079	12,66
Latis yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	1,54	1,57	0,59	0,59	0,49	1,55	0,55
Nispi yoğunluğu	0,576	0,588	0,220	0,220	0,183	0,580	0,205
Porozite Oranı	0,42	0,41	0,78	0,78	0,82	0,42	0,79

## 5.2. SEM Görüntüleri

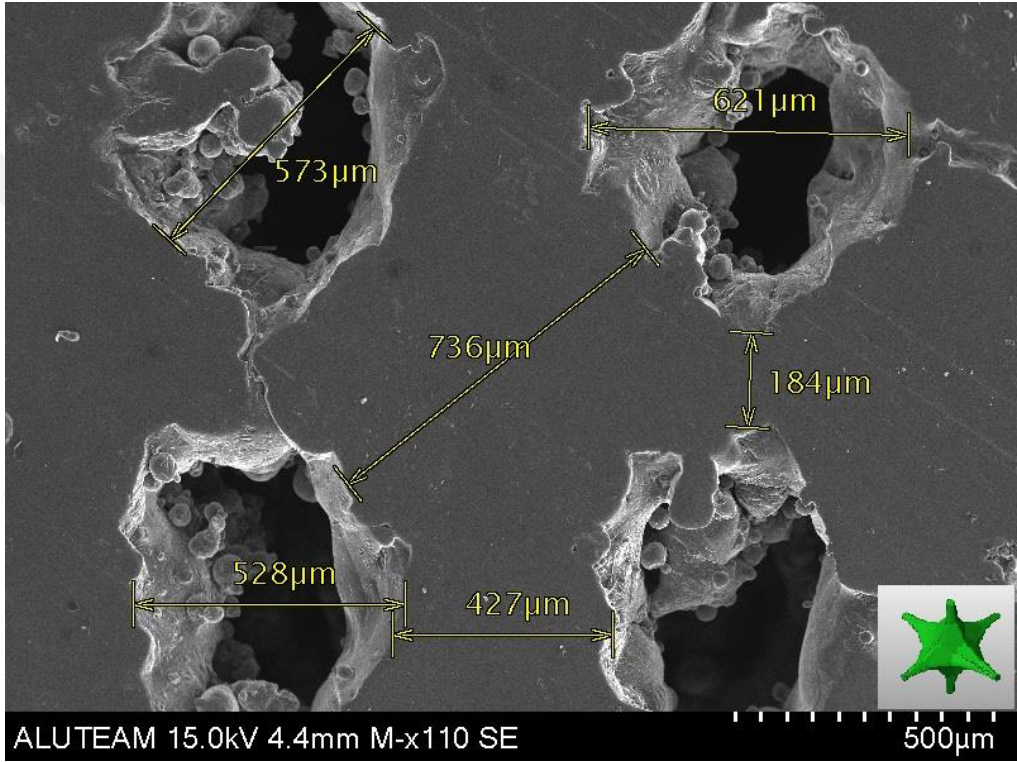
Üretilen latis yapıların SEM ile alınan görüntüleri incelendi. Alınan görüntülerde latis yapıların hücre boyutlarının tasarım verileri ile yakın olduğu görüldü.



Şekil 5.2. T1 numunesi SEM görüntüsü

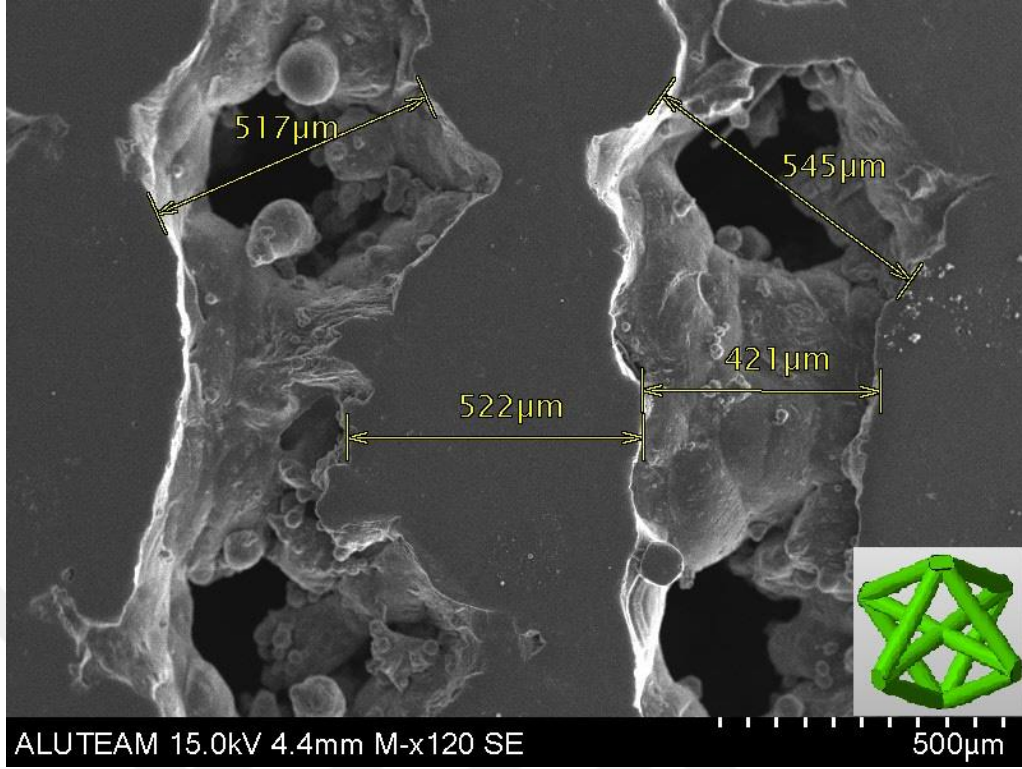
Şekil 5.2’de T1 numunesinin 150x yaklaşıma ile alınan SEM görüntüsü verildi. Hücre duvarları 0,19 mm ile 0,3 mm, hücreler arasında mesafe 0,13 mm ile 0,3 mm arasındadır.

Farklı işlem parametresi ile üretilen T1 numunesinde gözeneklerin diğer üretilen latis yapılara göre homojen olmadığı görüldü. Bu durum literatür incelendiğinde işlem parametresi ile ilgili olduğu ve enerji yoğunluğunun artırılması gerektiği tahmin edilmektedir.



Şekil 5.3. D1 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 5.3’te D1 numunesinin 110x yaklaşıma ile alınan SEM görüntüsü verildi. küresel boşlukların çapı 0,528 mm ile 0,621 mm arasında, hücre çekirdeklerinin çapları yaklaşık 0,736 mm ve dikmelerin kalınlıkları yaklaşık 0,42 mm olduğu ölçüldü. SEM görüntülerinde sinterlenen alanların etrafında toz tanecikleri görüldü. Bu toz taneleri kısmi olarak katılaştıran yüzeylerle birleştiği görülmektedir.



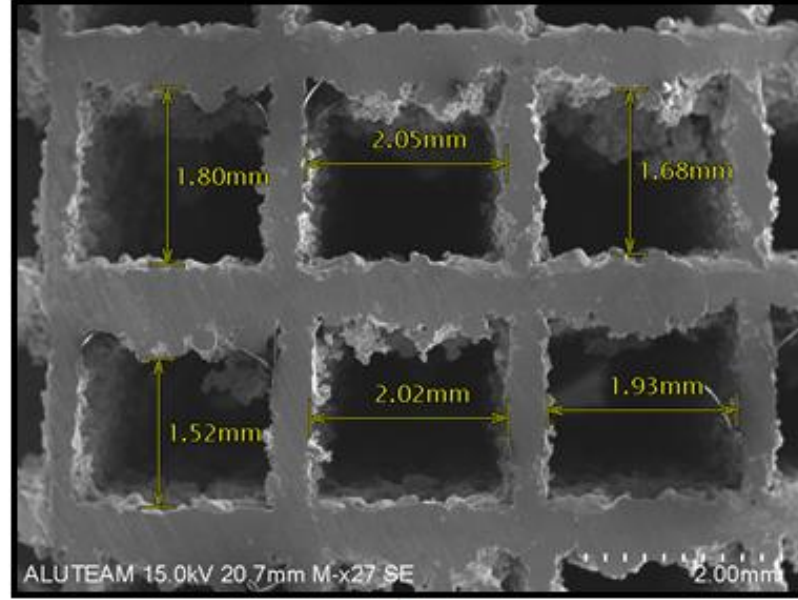
Şekil 5.4. C1 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 5.4'te C1 numunesinin 120x yaklaşıma ile alınan SEM görüntüsü verildi. Hücreler arasında kalan boşluklar 0,517 mm ile 0,545 mm arasında değişmektedir. Hücre çekirdekleri yaklaşık 0,5 mm'dir. Hücreleri bağlayan dikmeler ise yaklaşık 0,42 mm kalınlıktadır.

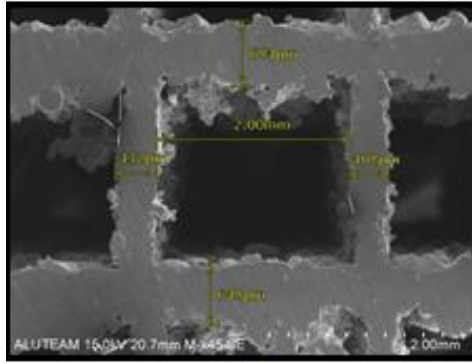
SEM görüntüleri incelendiğinde hücreler arası boşlukların büyüklüklerini ve homojenliğini serbest toz taneciklerinin etkilediği görüldü. Bu durumun hücrelerin gözeneklerinin küçük olması ve yapının tasarımında bulunan artı kolların etkisi olduğu düşünülmektedir.

DMLS yönteminde ürün bal peteği formuna sahip ince et kalınlığı olan destek yapılar kullanılmaktadır üretimden sonra bu yapılar numuneden temizlenirler. Bu yapılar üretilecek olan numunenin tablaya tutunmasını ve parçanın desteklenmesi için kullanılmaktadır. Destek yapısı olmadan da üretim yapılabilmektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu kullanılarak yapılacak üretimlerde parçanın toz yatağı içinde askıda kaması ve kendisini destekleyebilmesi için ürünün platforma göre 45° açılar ile tasarlanması ve üst yüzeyinin boş olması gerekmektedir. D1 latis yapının hücrelerinin dikmeleri birbirlerini destekler şekilde tasarlanmıştır. Fakat dikmelerin arasında

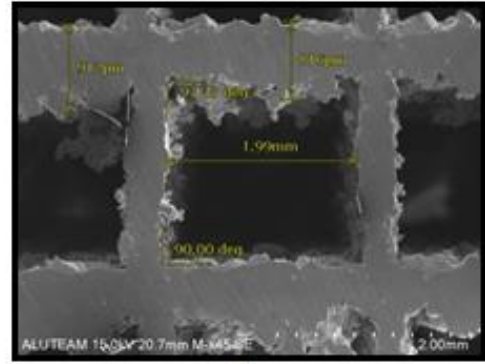
bulunan ve tablaya paralel olan artı kollar hücrenin boyutları arttığında desteklere ihtiyaç duyacaktır. Destek yapılar gözenekler arası mesafenin az ve hücre boyutlarının küçük olmasından dolayı kullanılmamıştır. Ayrıca hücre boyutların bu kadar küçük olmasından dolayı destek yapıların sökülmesi mümkün değildir.



A



B

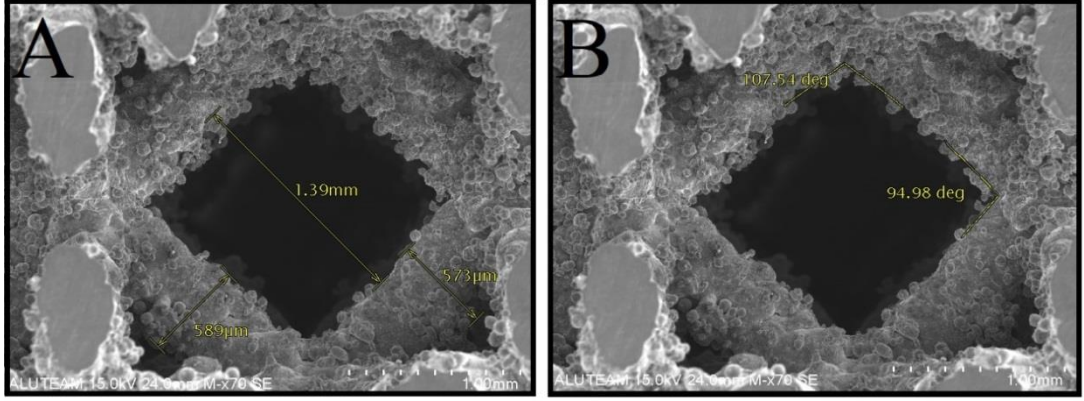


C

Şekil 5.5. C2 numunesi SEM görüntüleri a) 27x yaklaşma, b-c) 40x yaklaşma

Şekil 5.5'te C2 numunesinin 27x ve 45x yaklaşma ile alınan SEM görüntüsü verildi. Hücreler arasında kalan boşluklar 1,52 mm ile 2,05 mm arasında ve dikme kalınlıkları 0,5 mm ile 0,9 mm olduğu ölçüldü. Hücrelerin duvarlarının birleşim açıları 900 ile 940 arasında değişmektedir. Şekil 4.6.'da verilen STL datasının ölçüleri ile Şekil 5.5'te verilen ölçülerin benzer olduğu görüldü.

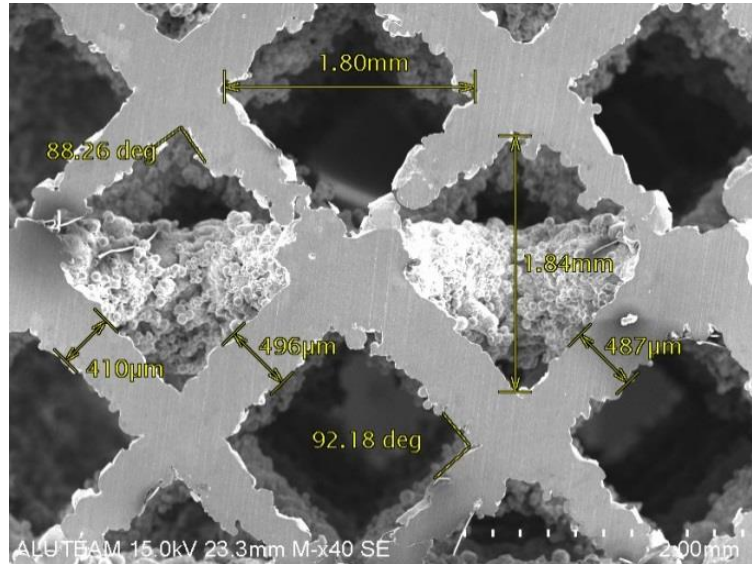




Şekil 5.6. L1 numunesi SEM görüntüsü a) birim hücre ölçüleri, b) birim hücre açıları

Şekil 5.6.a ve Şekil 5.6.b'de L1 numunesinin 70x yaklaşma ile alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Hücreler arasında kalan boşluklar yaklaşık 1,39 mm, dikmeleri kalınlıkları yaklaşık 0,58 mm ve duvarlarının birleşim açıları  $95^0$  ile  $108^0$  arasında olduğu ölçüldü.

L1 latis yapısının Şekil 4.9'da STL datasından alınan ölçüler ile Şekil 5.6'da SEM görüntülerinden alınan ölçüler büyük oranda benzerdir. Fakat açılarda ve dikme boyutlarında değişkenlikler görülmektedir. Bu değişkenliğin SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi yapıya sinterlenen fazla toz tanelerinin sebep olduğu görülmektedir.

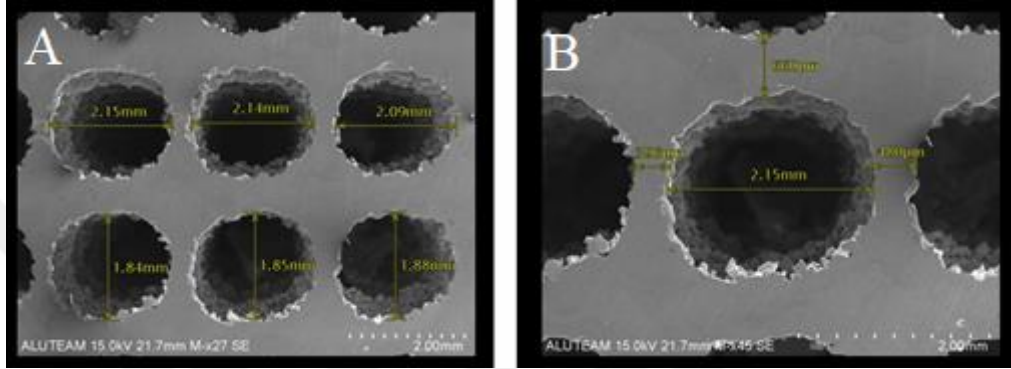


Şekil 5.7. P1 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 5.7'de P1 numunesinin 40x yaklaşma ile alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Hücreler arasında kalan boşluklar yaklaşık 1,8 mm, dikme kalınlıkları

0,4 mm ile 0,5 mm arasında ve hücre kollarının birleşim açıları  $88^{\circ}$  ile  $93^{\circ}$  arasında olduğu ölçüldü.

P1 latis yapısının Şekil 4.12’de STL datasından alınan ölçüler ile Şekil 5.7’de SEM görüntülerinden alınan ölçüler büyük oranda benzerdir. Fakat açılarda ve dikme boyutlarında değişkenlikler görülmektedir. Bu değişkenliğin SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi yapıya sinterlenen fazla toz tanelerinin sebep olduğu görülmektedir.



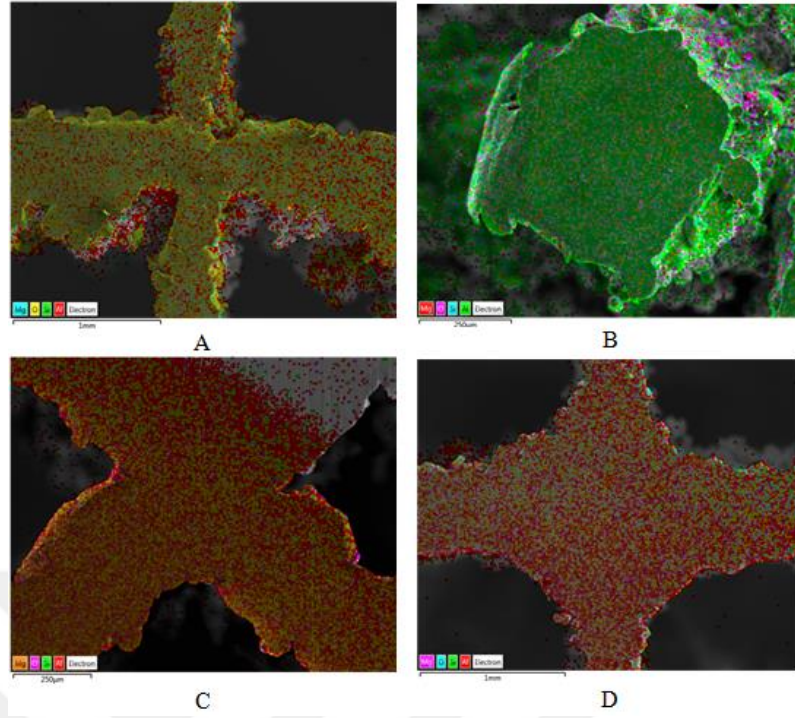
Şekil 5.8. D2 numunesinin SEM görüntüleri a) 27x yaklaşma, b) 40x yaklaşma

Şekil 5.8.a. ve Şekil 5.8.b.’de D2 numunesinin 27x ve 40x yaklaşma ile alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Hücreler arasında kalan boşlukların çapları 1,84 mm ile 2,15 mm arasında ve dikmeleri kalınlıkları 0,39 mm ile 0,66 mm arasında olduğu ölçüldü. D2 latis yapısının Şekil 4.16’da STL datasından alınan ölçüler ile Şekil 5.8.’de SEM görüntülerinden alınan ölçüler büyük oranda benzerdir. Fakat boşluk çaplarında ve dikme boyutlarında değişkenlikler görülmektedir.

### 5.3. EDS Analizleri

Üretilen latis yapıların elementel analizleri incelenerek oksitlenme oranları karşılaştırıldı.

Şekil 5.9’da bazı latis yapılara ait elemen haritası verildi. Tablo 5.2’de üretilen latis yapıların EDS ile yapılan element analizine göre oksijen oranları verildi. Tablo incelendiğinde oksijen oranlarının yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9. EDS ile 2 boyutta alınan element dağılım haritası c) C2 numunesi, b) L1 numunesi, c) P1 numunesi, d) D1 numunesi

Tablo 5.2. Numunelerin oksijen oranları

Numune	T1	C1	C2	L1	P1	D1	D2
Oksijen oranı (%)	47,5	47,5	46,9	47,4	47,3	47,5	47

#### 5.4. Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik ölçümleri 1,961 N yük altında 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik Her numune için 6 ayrı izin ortalaması alınarak Tablo 5.3'te verildi. Latislerin sertlik değerlerinde belirgin bir farklılık görülmedi.

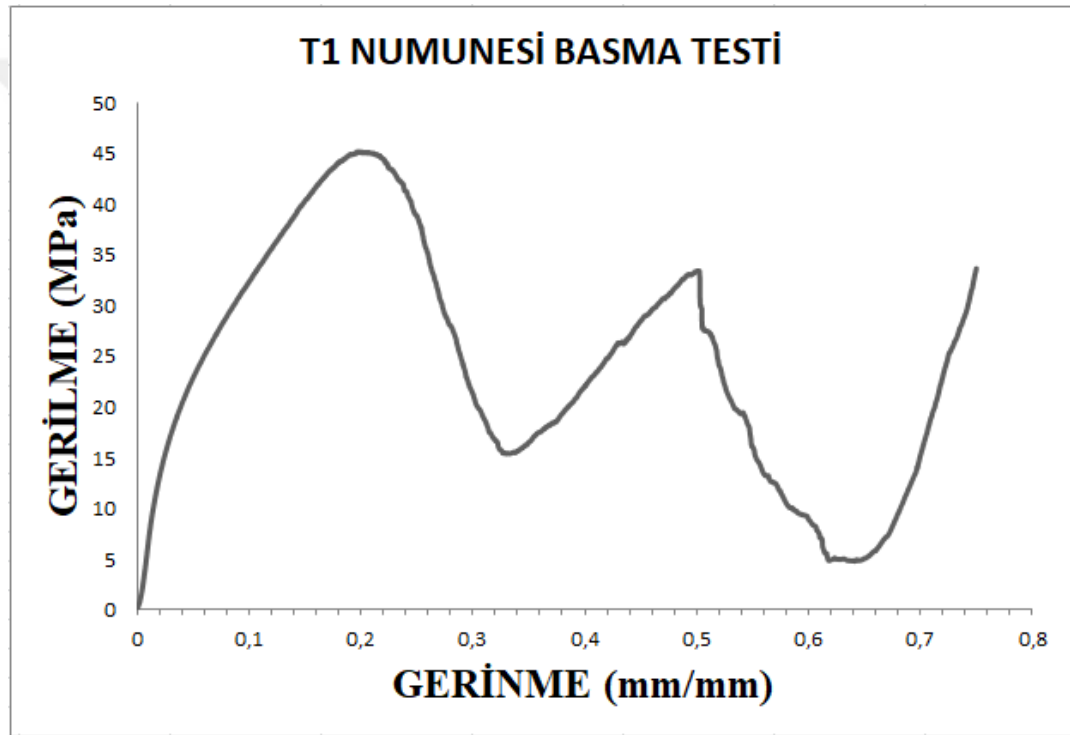
Tablo 5.3. Üretim sonrası Vickers sertlik değerleri

Numune	T1	C1	C2	L1	P1	D1	D2
Vickers Sertlik (HV)	118	120	119	121	117	120	120

### 5.5. Basma Testi Sonuçları

Üretilen numunelerin basma testleri her bir tasarım için gerçekleştirilmiştir. Basma testleri farklı tip birim hücreler ve aynı tip birim hücrelerin farklı boyutları açısından karşılaştırılmıştır.

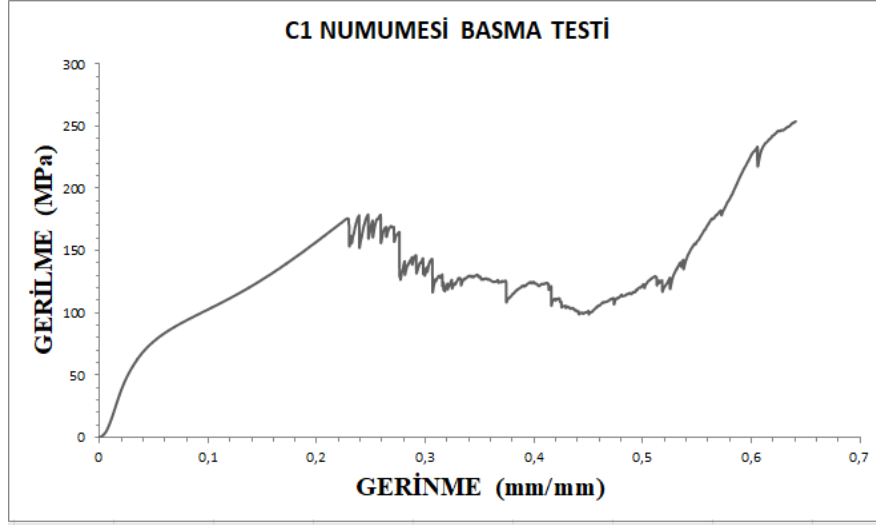
Gözenekli yapıların basma testi gerilme-gerinim grafikleri lineer elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi olmak üzere üç farklı bölge oluştuğu görülmüştür. Basma deneyleri sonucunda aynı ağırlığa sahip farklı tip latis yapıların gerilme-gerinim değerleri üzerinde farklı basma karakteristik eğriler sergilediği gözlemlendi.



Şekil 5.10. T1 numunesi gerilme-gerinim grafiği

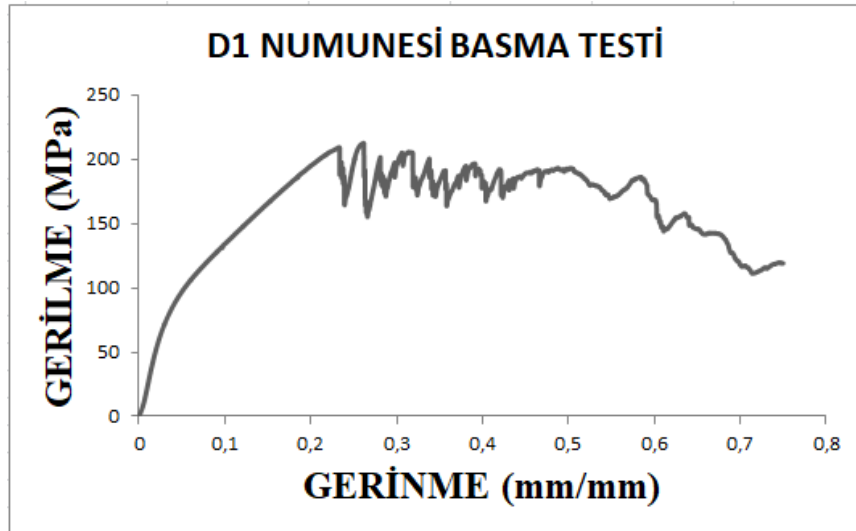
İşlem parametresinin değiştirilmesi ile üretilen gözenekli T1 numunesinin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.10'da verildi. Lineer elastik davranış yaklaşık % 20 gerinime kadar gözlemlendi. Plato bölgesinde burulma ve gevrek kırılmanın bir özelliği olan stres dalgalanmaları görülmektedir. Gözeneklerde oluşan kırılmalar ile eğride keskin bir düşüş görülmektedir. Yoğunlaşma bölgesinde gözeneklerin kırılarak porozitenin azalması sonucu gerinim ile gerilmeye artış görülmektedir. Yoğunlaşma bölgesi yaklaşık %65 gerinmeden sonra başladığı gözlemlendi.



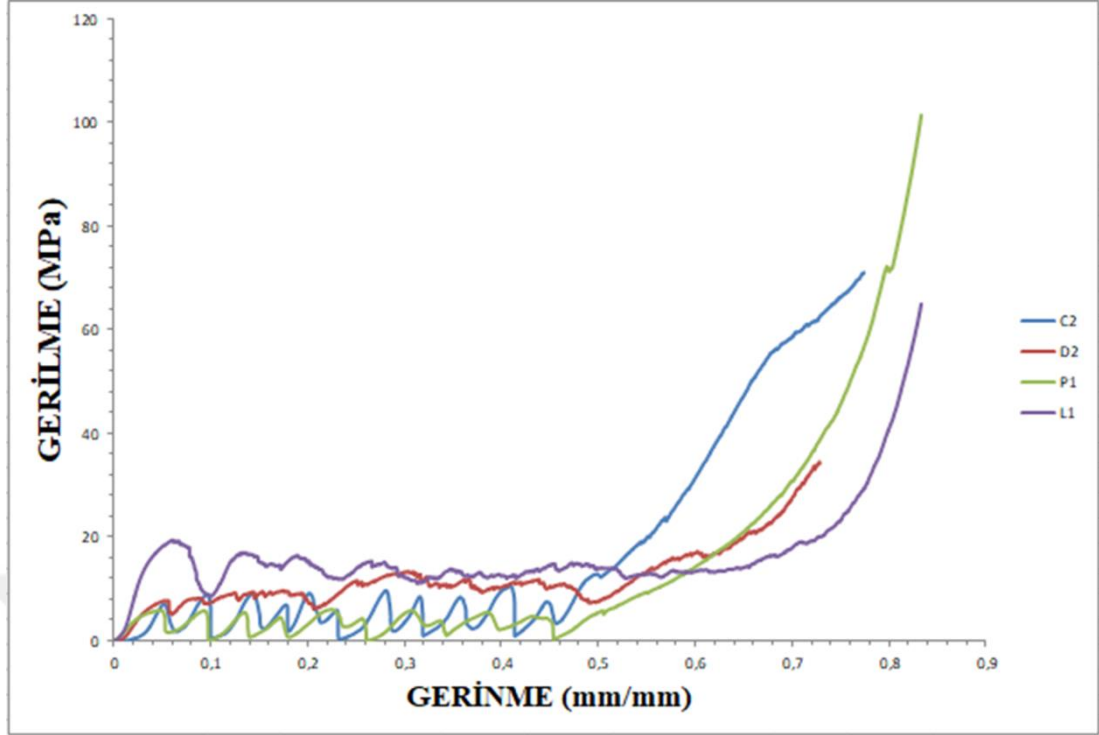


Şekil 5.11. C1 numunesi gerilme –gerinim grafiği

C1 numunesinin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.11’de verildi. Lineer elastik davranış yaklaşık %23 gerinim değerine kadar gözlemlenmiştir. Plato bölgesinde gerinim değerine oranla gerilme değeri çok yükselmemiştir. Bu bölgede burulma ve gevrek kırılmanın bir özelliği olan stres dalgalanmaları görülmektedir. Gözeneklerde oluşan kırılmalar ile eğride keskin bir düşüş görülmüştür. Yoğunlaşma bölgesinde gözeneklerin kırılarak porozitenin azalması sonucu gerinim ile gerilmede artış görülmektedir. Yoğunlaşma bölgesi yaklaşık %50 gerinmeden sonra başladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.12. D1 numunesi gerilme–gerinim grafiği



Şekil 5.13. C2, D2, P1, L1 numunelerinin gerilme–gerinim grafiği

C2, D2, P1 ve L1 numunelerinin gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.13'te verildi. Grafiklerde elastik-kırılgan gözenekli yapıların tipik basma karakteristiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde L1 ve D2 latislerinin plato bölgesinin belirgin olduğu ve gerinme artarken gerilimin sabite yakın olduğu görülmektedir. Aynı nispi yoğunlukta olan gerilme hakim yapıda olan L1 numunelerinin mekanik özelliklerinin eğilme hakim olan C1 numunesinden daha iyi olduğu tespit edildi.

Literatür incelendiğinde latislerin yoğunluk farklarının basma dayanımlarına etkisinin olduğu görülmüştür. Yoğunluk verileri incelendiğinde C2, D2, P1, L1 numunelerinin yoğunluklarının T1, C1, D1 numunelerine göre düşük olduğu görülmektedir. Yoğunluğu en yüksek olan D1 numunesinin elastik bölgede ulaşılan gerilim değerinin de en yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 5.4'te basma testi ile elde edilen akma mukavemetleri, elastisite modülleri ve  $C_1, C_2$  sabitleri gösterilmektedir. T1, C1, C2, P1, D1, D2 latislerinde  $M < 0$  olduğu için Denklem (2,2) ve Denklem (2,3), L1 latisinde ise  $M \geq 0$  olduğu için Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) kullanıldı.  $C_1$  sabiti Gibson ve Ashby köpük metal modelinden düşük olduğu görülmektedir. C2 ve P1 latisleri hariç  $C_2$  sabiti metalik köpük yapıları için öngördüğünden daha yüksektir.

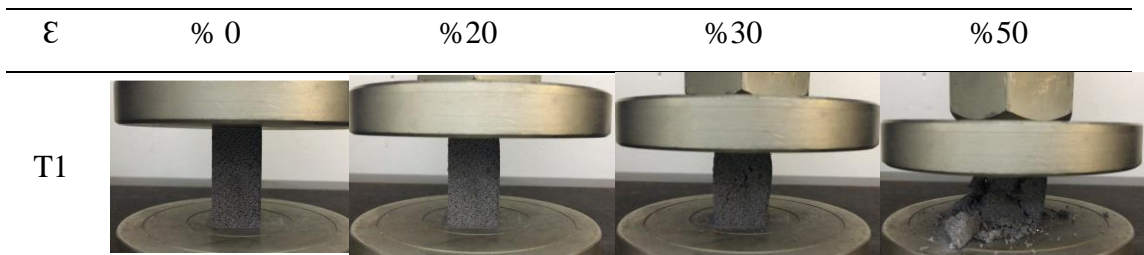
Tablo 5.4. Numunelerin nispi yoğunlukları, akma mukavemetleri, elastisite modülleri ile Gibson ve Ashby modeline göre hesaplanan  $C_1, C_2$  sabitleri

Numune İsmi	Nispi Yoğunluğu	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	$C_1$ (denyesel)	$C_2$ (denyesel)
T1	0,576	45,1	225,46	0,01	0,43
C1	0,588	170,6	775,56	0,03	1,58
C2	0,22	6,8	136	0,04	0,27
L1	0,22	19,4	323	0,021	0,365
P1	0,183	5,8	115,2	0,048	0,3
D1	0,58	208	904,5	0,038	1,96
D2	0,205	7,6	151,4	0,05	0,34

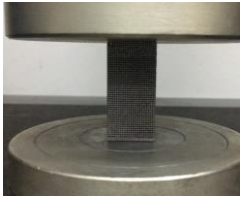
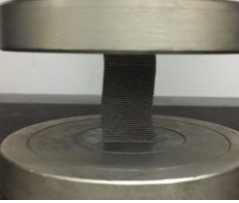
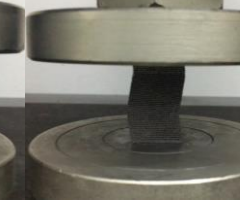
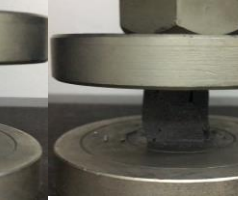
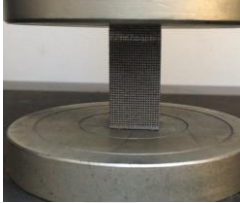
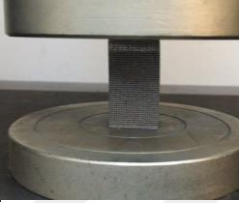
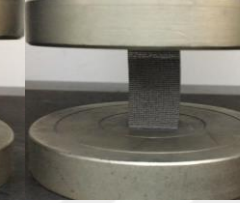
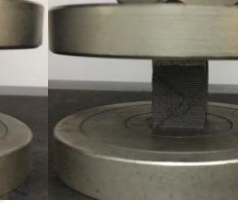
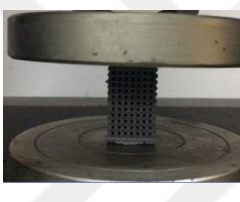
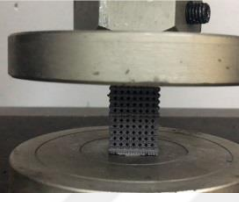
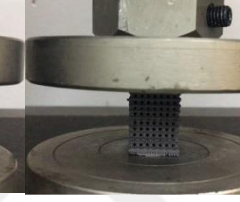
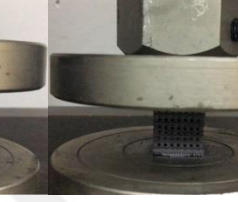
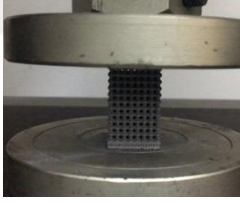

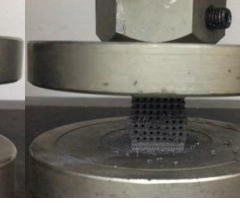
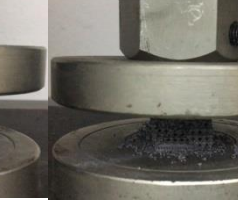
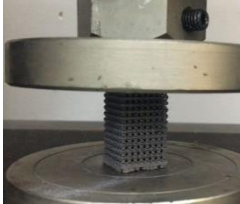
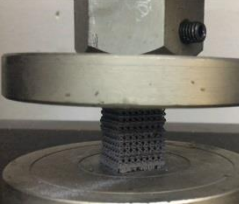
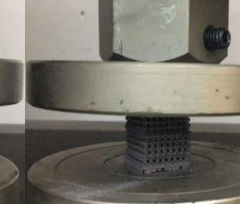
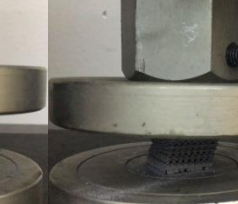
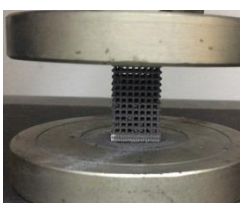
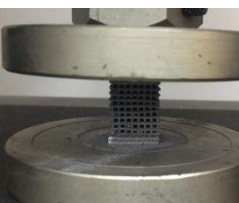
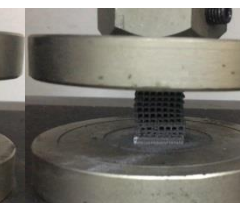
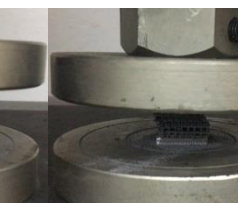
Latis yapıların yarı statik basma testinde farklı birim şekil değiştirmelerine (%0, %20, %30 ve %50) ait görüntüler Tablo 5.5'te verildi. C1, D1, P1 ve D2 numunelerinin eğilme hakim mekanizmalarda olduğu gibi bir deformasyon sergiledikleri ve gerilme arttıkça desteklerin eğilmeye başladığı görüldü. Ayrıca;

- T1, C2 ve L1 numunelerinin deformasyonları incelendiğinde gerilmenin hakim olduğu,
- T1 numunesinde %20 gerinmeden sonra başlayan 45°'lik çatlak oluştuğu ve yoğunlaşma esnasında hücrelerde dağılmalar olduğu,
- C1, P1 ve D2 numunelerinde “z” şeklinde bir bükülmenin hakim olduğu,
- L1 ve D1 numunelerinde yoğunlaşma öncesinde düzenli bir deformasyon varken yoğunlaşma esnasında kırılmalar ve dağılmalar olduğu,
- C2 numunesinde hücrelerin birbirleri üstüne birleştiği düzenli bir deformasyonun oluştuğu görülmektedir.

Tablo 5.5. Latis yapıların farklı birim şekli değiştirmede yarı statik basma testi görüntüleri



Tablo 5.5.(Devam) Latis yapıların farklı birim şekli değişikliğinde yarı statik basma testi görüntüleri

$\epsilon$	% 0	%20	%30	%50
C1				
D1				
C2				
L1				
P1				
D2				

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında geleneksel üretim metotlarına göre tasarım kısıtların az olduğu katmanlı imalat teknolojisi olan DMLS metodu kullanılarak AlSi10Mg malzeme ile 4 farklı tip latis yapı üretildi.

Tarama aralığı standart parametreye göre 0,19 mm'den 2 mm'ye yaklaşık 10 kat arttırılarak üretilen gözenekli yapı ile aynı ağırlıkta farklı tip latis yapılar kıyaslandı. Üretilen numunelerin ağırlıklarının teorik verilere göre %10-15 oranında yüksek olduğu tespit edildi. SEM görüntüleri incelendiğinde, ağırlıktaki artışın dikmelerin etrafında bulunan kısmi sinterlenmiş toz tanelerinden kaynaklandığı tespit edildi.

Üretilen yapıların tasarımları ile SEM görüntüleri karşılaştırıldığında latis yapıların DMLS metodu ile başarılı bir şekilde üretebileceği görüldü. Tarama aralığı değiştirilerek üretilen T1 numunesinin gözenek boyutlarının düzensiz olduğu görüldü. Bu düzensizliğin nedeninin kullanılan enerji yoğunluğunun standart işlem parametresine göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. C1, C2, D1, D2, P1 ve L1 latis yapıların gözenek geometrileri ve ölçülerinin tasarım verileri ile uyduğu görüldü. Ayrıca sinter yüzeylerinin pürüzlü olduğu ve kısmi sinterlenmiş toz parçacıklarının dikme yüzeyine bağlı olduğu görüldü.

Latislerin yoğunluk farklarının basma dayanımlarına etkisinin olduğu görüldü. Yoğunlukların artmasıyla elastik bölgede ulaşılan gerilimin arttığı gözlemlendi. Grafiklerde elastik-kırılgan gözenekli yapıların tipik basma karakteristiği görüldü. Aynı nispi yoğunlukta olan gerilme hakim yapıların mekanik özelliklerinin eğilme hakim olan yapılardan daha iyi olduğu tespit edildi. Basma davranışları incelendiğinde gerilim-gerinim eğrileri üzerinde birden fazla gerilim tepe noktasının olduğu ve bunların kesme deformasyonu ve ezilme davranışlarından kaynaklandığı görüldü. Basma testi verilerine göre DMLS işlemi ile üretilen Spaceclaim programından tasarlanan birim hücreler ile oluşturulacak latis yapıların mekanik özelliklerini tahmin etmek için Gibson ve Ashby modeline dahil edilen  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları belirlendi. Bunlar, gelecekteki tasarım için deneysel çalışma yapılmadan

double pyramid lattice with cross yapı, double pyramid lattice with lateral yapı, double pyramid lattice without the lateral ve dimensional lattice infill pattern latis yapılarının akma mukavemeti ve elastite modülü açısından mekanik özellikleri tahmin etmek için kullanılabilir.

Spaceclaim programı ile topoloji optimizasyonu ve ısı değiştiricilerde yüzey alanını arttırmak için latis yapı örnekleri tasarlanabilir ve DMLS yöntemi ile üretilerek test edilebilir. Böylece hem test hem de analiz sonuçları karşılaştırılıp doğrulanabilir. DMLS metottu ile üretilcek latis yapıların karakteristik özelliklerini ve analitik yaklaşımları geliştirilmesi amacıyla uygun işlem parametreleri ve birim hücre tipleri üzerinde çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Gibson L. J., Ashby M. F., Cellular Solids, 2nd Ed., *Cambridge Solid State Science Series*, Cambridge, 1997.
- [2] Ashby M.F., Medalist, R.F.M., Mechanical Properties of Cellular Solids, *Metallurgical Transactions A*, Physical metallurgy and materials science, 1983, **14**(9), 1755–1769.
- [3] Banhart J., Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams, *Materials Science*, DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
- [4] Özer G., Alüminyum Esaslı Köpük Metal Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 198965.
- [5] De Meller M.A., Produit métallique pour l'obtention d'objets laminés, moulés ou autres, et procédés pour sa fabrication, French Patent No. FR 615147A , 1926, *France*.
- [6] Banhart J., Light Metal Foams History of Innovation and Technological Challenges, *Advanced Engineering Materials*, 2013, **15**(3), 82–111.
- [7] Sosnick B., Process for Making Foamlike Mass Of Metal, 1948, U.S. Patent No. US2434775, *U.S. Patent Office*.
- [8] Elliott J. C., Metal Foam and Method for Making, 1961, U.S. Patent No. US2983597 , *U.S. Patent Office*.
- [9] Ozan S., Katı N., Metal Köpükler, *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.
- [10] Quadbeck P., Kümmel K., Hauser R., Standke G., Open Cell Metal Foams-Application-Oriented Structure and Material Selection, *International Conference on Cellular Materials*, Dresden, Almanya , 27-29 Ekim 2010.
- [11] Çağlar S., Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009, 256223.
- [12] Ertürk A., Alüminyum Köpük Malzemelerin Uygulamaya Yönelik Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348737.
- [13] Gibson L.J., Modelling The Mechanical Behavior of Cellular Materials, *Materials Science and Engineering: A*, DOI:10.1016/0921-5093(89)90154-8
- [14] Yan C., Hao L., Hussein A., Bubb S.L., vd., Evaluation of Light-Weight

- AlSi10Mg Periodic Cellular Lattice Structures Fabricated Via Direct Metal Laser Sintering, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, **214**(4), 856–864.
- [15] Li W., Sun F., Wang P., Fan H., vd., A Novel Carbon Fiber Reinforced Lattice Truss Sandwich Cylinder: Fabrication And Experiments, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.11.034.
- [16] Nazir A., Abate K.M., Kumar A., Jeng J.Y., A State of The Art Review on Types, Design, Optimization and Additive Manufacturing of Cellular Structures, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, **104**(9-12), 3489–3510.
- [17] Wohlers T., Gornet T., History of Additive Manufacturing, *Wohlers Report*, 24, 118, 2014.
- [18] Brooks W., Sutcliffe C., Cantwell W., Fox P., vd., Rapid Design and Manufacture of Ultralight Cellular Materials, *16th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Madison, Amerika, 26 Ağustos 2005.
- [19] Bulduk M.E., Ertürk A.T., Coşkun M., Tarakçi G., vd., The Microstructure and Mechanical Properties of Porous Structures Produced From AlSi10Mg by Direct Metal Laser Sintering, *AMC Turkey*, İstanbul , Türkiye, 17-18 Ekim 2019.
- [20] Pattanayak D.K., Fukuda A., Matsushita T., Takemoto M., vd., Bioactive Ti Metal Analogous To Human Cancellous Bone: Fabrication by Selective Laser Melting and Chemical Treatments, *Acta Biomaterialia*, 2011, **7**(3), 1398–1406.
- [21] Yan C., Hao L., Hussein A., Young P., Ti-6Al-4V Triply Periodic Minimal Surface Structures For Bone Implants Fabricated Via Selective Laser Melting, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, **51**, 61–73.
- [22] Sallica-Leva E., Jardini A.L., Fogagnolo J.B., Microstructure and mechanical Behavior of Porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, **26**, 98–108.
- [23] Zhang S., Wei Q., Cheng L., Li S., vd., Effects of Scan Line Spacing on Pore Characteristics and Mechanical Properties of Porous Ti6Al4V Implants Fabricated by Selective Laser Melting, *Materials & Design*, 2014, **63**, 185–193.
- [24] Qiu C., Yue S., Adkins N.J.E., Ward M., vd., Influence of Processing Conditions on Strut Structure and Compressive Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting, *Materials Science and Engineering A*, 2015, **628**, 188–197.



- [25] Arabnejad S., Burnett Johnston R., Pura J.A., Singh B., vd., High Strength Porous Biomaterials for Bone Replacement: A Strategy to Assess The Interplay Between Cell Morphology, Mechanical Properties, Bone Ingrowth and Manufacturing Constraints, *Acta Biomaterialia*, 2016, **30**, 345–356.
- [26] Harris J.A., Winter R.E., McShane G.J., Impact Response of Additively Manufactured Metallic Hybrid Lattice Materials, *International Journal of Impact Engineering*, 2017, **104**, 177–191.
- [27] Sing S.L., Wiria F.E., Yeong W.Y., Selective Laser Melting of Lattice Structures: A Statistical Approach to Manufacturability and Mechanical Behavior, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, **49**, 170–180.
- [28] Zhou H., Zhang X., Zeng H., Yang H., vd., Lightweight Structure of A Phase-Change Thermal Controller Based on Lattice Cells Manufactured by SLM, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, **32**, 1727–1732.
- [29] Lei H., Li C., Meng J., Zhou H., vd., Evaluation of Compressive Properties of SLM Fabricated Multi Layer Lattice Structures By Experimental Test and  $\mu$ -CT Based Finite Element Analysis, *Materials and Design*, 2019, **169**, 107685.
- [30] Alabort E., Barba D., Reed R.C., Design Of Metallic Bone by Additive Manufacturing, *Scripta Materialia*, 2019, **164**, 110–114.
- [31] Banhart J., Manufacturing routes for metallic foams, *Jom*, 2000, **52**(12), 22–27.
- [32] Banhart J., Weaire D., On The Road Again: Metal Foams Find Favor, *Physics Today*, 2002, **55**(7), 37–42.
- [33] Körner C., Singer R.F., Processing of Metal Foams Challenges and Opportunities, *Advanced Engineering Materials*, 2000, **2**(4), 159–165.
- [34] Wadley H.N.G., Cellular Metals Manufacturing, *Advanced Engineering Materials*, 2002, **4**(10), 726–733.
- [35] Banhart J., Seeliger H., Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications, *Advanced Engineering Materials*, 2008, **10**, 793–802.
- [36] Zhu F., Lu G., Ruan D., Wang Z., Plastic Deformation, Failure and Energy Absorption of Sandwich Structures with Metallic Cellular Cores, *International Journal of Protective Structures*, 2010, **1**(4), 507–541.
- [37] Leary M., Mazur M., Elambasseril J., McMillan M., Chirent T., Sun Y., Qian M., Easton M., Brandt M., Selective Laser Melting (SLM) of AlSi12Mg Lattice Structures, *Materials & Design*, 2016, **98**, 344–357.
- [38] Xiao Z., Yang Y., Xiao R., Bai Y., Song C., Wang D., Evaluation of Topology Optimized Lattice Structures Manufactured via Selective Laser Melting,

*Materials & Design*, 2018, **143**, 27–37.

- [39] Deshpande V.S., Fleck N.A., Ashby M.F., Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, **49**(8), 1747–1769.
- [40] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B., Zhang X., Qian M., Faruque O., Brandt M., SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges, *Materials & Design*, 2019, **183**, 108-137.
- [41] Guo J., Zhou Y., Liu C., Wu Q., Chen X., Lu J., Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency, *Materials*, 2016, **9**(10), 823.
- [42] Hu Z., Qin X., Shao T., Liu H., Understanding and Overcoming of Abnormity At Start and End of the Weld Bead in Additive Manufacturing with GMAW, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, **95**(5–8), 2357–2368.
- [43] Somashekara M.A., Suryakumar S., Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, **70**(8), 2123–2135.
- [44] Edgar J., Tint S., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, *Johnson Matthey Technology Review*, 2015, **59**(3), 193–198.
- [45] Poyraz Ö., Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Kullanılan Proses Parametrelerinin Etkisinin, Modelleme ve Simülasyon Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2018, 522682.
- [46] Bermingham M. J., Nicastro L., Kent D., Chen Y., Dargusch M. S., Optimising the Mechanical Properties of Ti6Al4V Components Produced by Wire Arc Additive Manufacturing with Post-Process Heat Treatments, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **753**, 247–255.
- [47] Fuchs J., Schneider C., Enzinger N., Wire-Based Additive Manufacturing Using an Electron Beam as Heat Source, *Welding in the World*, 2018, **62**(2), 267–275.
- [48] Ge J., Lin J., Chen Y., Lei Y., et al., Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **748**, 911–921.
- [49] Ayan Y., Kahraman N., Metal Eklemeli İmalat: Tel Ark Yöntemi ve Uygulamaları, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2018, **2**(3), 74–84.
- [50] Lengua C.A.G., History of Rapid Prototyping, Editör: Farooqi K. M., *Rapid Prototyping in Cardiac Disease*, Springer, Cham, 3–7 , 2017.

- [51] Ishengoma F.R., Mtaho A.B., 3D Printing: Developing Countries Perspectives, *International Journal of Computer Applications*, 2014, **104**(11), 30-34.
- [52] Vaezi M., Seitz H., Yang S., A Review on 3D Micro-Additive Manufacturing Technologies, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, **67**(5-8), 1721-1754.
- [53] Sun G.F., Shen X.T., Wang Z.D., Zhan M.J., Yao S., Zhou R., Ni Z. H., Laser Metal Deposition as Repair Technology for 316L Stainless Steel: Influence of Feeding Powder Compositions on microstructure and Mechanical Properties, *Optics & Laser Technology*, 2019, **109**, 71-83.
- [54] Wahlström T., Sahlström J., Additive Manufacturing in Production, Yüksek Lisans Tezi, Tasarım Bilimleri Departmanı, Lund Üniversitesi, 2016.
- [55] Lee J.-Y., An J., Chua C.K., Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials, *Applied Materials Today*, 2017, **7**, 120-133.
- [56] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive Manufacturing of Metals, *Acta Materialia*, 2016, **117**, 371-392.
- [57] Turhan S., Özsoy A., DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2016, **8**(2), 15-27.
- [58] Shi J.L., Thermodynamics and Densification Kinetics in Solid-State Sintering of Ceramics, *Journal of Materials Research*, 1999, **14**(4), 1398-1408.
- [59] Nandy J., Sarangi H., Sahoo S., A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling, *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, **6**(3), 280-316.
- [60] Manfredi D., Ambrosio E.P., Calignano F., Krishnan M., Canali R., Biamino S., Pavese M., Atzeni E., Iuliano L., Fino P., Badini C., Direct Metal Laser Sintering: an additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications, *La Metallurgia Italiana*, **10**, 2013.
- [61] Nathan A.J., Scobell A., How China Sees America: The Sum of Beijing's Fears, *Foreign Affairs*, 2012, **91**(5), 2012.
- [62] Vander Voort G., Atlas of Aluminum Microstructures, Editors: MacKenzie D. S., Totten G. E., *Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys*, 1st ed., CRC Press, Florida, 55-156, 2005.
- [63] Girelli L., Tocci M., Gelfi M., Pola A., Study of Heat Treatment Parameters for Additively Manufactured AlSi10Mg in Comparison with Corresponding Cast Alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2019, **739**, 317-328.
- [64] Ghasri-Khouzani M., Peng H., Attardo R., Ostiguy P., Neidig J., Billo R., Hoelzle D., Shankar M.R., Comparing Microstructure and Hardness of Direct

Metal Laser Sintered AlSi10Mg Alloy between Different Planes, *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, **37**, 274–280.

- [65] Brice C., Shenoy R., Kral M., Buchannan K., Precipitation Behavior of Aluminum Alloy 2139 Fabricated Using Additive Manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **648**, 9–14.
- [66] Yan C., Hao L., Hussein A., Young P., et al., Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Alloy Cellular Lattice Structures Manufactured by Direct Metal Laser Sintering, *Materials Science and Engineering A*, 2015, **628**, 238–246.
- [67] URL-1:  
[https://gpiprototype.com/pdf/EOS\\_Aluminium\\_AlSi10Mg\\_%0Aen.pdf](https://gpiprototype.com/pdf/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_%0Aen.pdf),  
(Ziyaret tarihi: 23 Nisan 2020).
- [68] URL-2: <https://www.eos.info/eos-m290>, (Ziyaret tarihi: 17 Aralık 2019).
- [69] Erdin N., Tarama Elektron Mikroskopunun Temel Prensipleri ve Numune Hazırlama, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 1986, **36**(3), 102–124.
- [70] Aydın İ., Yer Tutucu Metodu ile Metalik Köpük Üretim ve Uygulamaya Yönelik Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2016, 436185.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Bulduk M.E.**, Ertürk A.T., Coşkun M., Tarakçı G., Ergin U., The Microstructure and Mechanical Properties Of Porous Structures Produced From AlSi10Mg by Direct Metal Laser Sintering, *AMC Turkey*, İstanbul , 17-18 Ekim 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Enes BULDUK 1994 yılında Konya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Adana ili İbn-İ Sina İlköğretim Okulu, Adana ili Dosteller İlköğretim okulu ve Konya ili Başak Koleji’nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 1 sene İngilizce hazırlık okuduktan sonra 2017 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2017 yılları Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine hak kazandı. 2018 yılından beri Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezinde araştırmacı mühendis olarak görev yapmaktadır. Mesleki hayatının bundan sonraki döneminde akademik çalışmalarına doktora programı ile devam etmek ve araştırma geliştirme faaliyetlerinde yer almak üzerine planlamaktadır.