



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN ALSİ10MG YENİ KAFES
YAPILARININ MEKANİK PERFORMANSI**

Hübannur ŞEREMET

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANA BİLİM DALI**

**SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2022

Hübanur ŞEREMET tarafından hazırlanan “SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN AlSi10Mg YENİ KAFES YAPILARININ MEKANİK PERFORMANSI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nazım BABACAN

Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Emre YURTKURAN

Makine Mühendisliği, Mekanik Ana Bilim Dalı, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

Makine Mühendisliği, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 20/09/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Doç. Dr. Emre BİÇER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Hübannur ŞEREMET
20/09/2022

SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE ÜRETİLEN AlSi10Mg YENİ KAFES YAPILARININ MEKANİK PERFORMANSI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hübanur ŞEREMET

SİVAS BİLİM ve TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Eylül 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında seçici lazer ergitme ile AlSi10Mg alaşımından üretilen kafes yapıların deneysel testler ile mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Mekanik davranışı incelemek için basma testleri tercih edilmiştir. Eklemeli imalat teknolojisi, geleneksel imalat teknolojileri ile imal edilmesi zor olan karmaşık kafes yapılarını imal etmek için kullanılabilir. Basma yüklemesi altında seçici lazer ergitme ile AlSi10Mg kullanılarak üretilen kafes yapılarının deformasyon mekanizmalarını ve kırılma davranışlarını incelemek için, dikey çubuk destekli yüzey merkezli kübik (FCCZ) ve dikey çubuk destekli hacim merkezli kübik (BCCZ) hücre topolojileri seçilmiştir. FCCZ-BCCZ ve bu yapılara eklenen dikey çubuklar ile özgün yapılar olan FCCZZ ve BCCZZ kafes numuneleri üç farklı çubuk çapına sahip olarak tasarlanmış sonrasında üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen tüm kafes numunelerine basma testleri yapılmış ve bu testler vasıtasıyla kafes blokların statik yük altındaki mekanik özellikleri ve çökme davranışları araştırılmış aynı zamanda deformasyon mekanizmaları incelenip, karşılaştırılmıştır. Ayrıca gerilme-gerinim eğrilerinden basma dayanımları hesaplanmış, hesaplanan bu değerler karşılaştırılmıştır. Kafes yapıların mekanik davranışlarını belirleyen en önemli parametrelerin, bağıl yoğunluk ve hücre topolojisi olduğu deneysel sonuçlardan ortaya çıkmıştır. FCCZ-FCCZZ numunelerinin basma dayanımı BCCZ-BCCZZ numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca özgün tasarımı olan 0,6 mm çubuk çapına sahip FCCZZ kafes yapısı tüm numuneler arasında en yüksek özgül dayanımın elde edildiği yapı olmuştur.

Bilim Kodu : 91421

Anahtar Kelimeler : Kafes Yapılar, Seçici Lazer Ergitme Yöntemi, Mekanik Özellikler, Birim Hücre Topolojisi, Yük Taşıma Kapasitesi, AlSi10Mg

Sayfa Adedi : 82

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nazım BABACAN

MECHANICAL PERFORMANCE OF ALSI10MG NOVEL LATTICE STRUCTURES
FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING

(M. Sc. Thesis)

Hübannur ŞEREMET

SİVAS UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

September 2022

ABSTRACT

In this thesis, it is aimed to investigate the mechanical behavior of lattice structures produced from AlSi10Mg alloy by selective laser melting with experimental tests. Compression tests were chosen to investigate the mechanical behavior. Additive manufacturing technology can be used to manufacture complex lattice structures that are difficult to produce with conventional manufacturing technologies. To investigate the deformation mechanisms and fracture behavior of the lattice structures made using AlSi10Mg by selective laser melting under compressive load, vertically supported face-centered cubic (FCCZ) and vertically supported body-centered cubic (BCCZ) cell topologies were chosen. FCCZ-BCCZ as well as by adding vertical struts to these structures, FCCZZ and BCCZZ novel structures were designed with three different strut diameters and then manufactured. Compression tests were performed on all produced lattice samples. The mechanical properties and collapse behavior of the lattice blocks under static load were investigated using these tests, and then the progressive failure modes were examined and compared. In addition, compressive strength were calculated from stress-strain curves, and these calculated values were compared. According to the experimental findings, it has been found that relative density and cell topology are the most important parameters that determine the mechanical behavior of the lattice structures. Compressive strength of the FCCZ-FCCZZ samples was higher than the BCCZ-BCCZZ samples. In addition, FCCZZ which is our novel design lattice structure with 0.6 mm strut diameter was the structure in which the highest specific strength was obtained.

Science Code : 91421

Key Words : Lattice Structures, Selective Laser Melting Method, Mechanical Properties, Unit Cell Topology, Load Carrying Capacity, AlSi10Mg

Page Number : 82

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nazım BABACAN

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans sürem boyunca bana yol gösteren, bilimsel olarak vizyonumun gelişmesini sağlayan, çalışmanın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen her konuda engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli hocam ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nazım BABACAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez jürimde yer alan Dr. Öğr. Üyesi Emre YURTKURAN ve Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN'a tezime olan katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarında bana yardımcı olan Oktay KAYA, Mustafa ÇALIŞKAN ve Arş. Gör. Müyesser ÇERÇİ başta olmak üzere AMASMA araştırma grubunda bulunan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezi hazırlamam için bana destek veren Alexander von Humboldt (AvH) Foundation'a, kafes numunelerin üretilmesindeki katkılarından dolayı ERMAKSAN'da çalışan Ahmet SEVER'e, deneysel testleri gerçekleştirmemdeki yardımlarından dolayı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde bulunan Arş. Gör. Habip Gökay KORKMAZ'a, SEM görüntüleri için CÜTAM'da laboratuvar desteği sağlayan Öğr. Gör. Halil İbrahim ÇETİNTAŞ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini benden asla esirgemeyen, bu hayattaki en büyük destekçilerim canım annem Zeynep ŞEREMET ve canım babam Muhammed ŞEREMET'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca manevi desteklerini üzerimden hiç çekmeyen biricik kardeşlerim Hafza Nur ŞEREMET, M. Furkan ŞEREMET ve Hümeysra ŞEREMET'e, psikolojik olarak yorulduğum her an neşe ve motivasyonu beni ayakta tutmayı başaran canım dostum Aişe Reyhan KARTAL'a teşekkür ederim. Motivasyonumu her zaman yükseltmeye çalışan değerli oda arkadaşım Ayşe Nur ÇAYIR, Arş. Gör. Vildan SERT ve adını buraya ekleyemediğim ama yanımda olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. |

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
TEŞEKKÜR.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Eklemeli İmalat	4
2.1.1. Eklemeli imalat üretim prensibi	6
2.1.2. Eklemeli imalat (3B baskı) teknolojileri	7
2.1.3. Eklemeli imalatta kullanılan toz malzemeler	11
2.2. Kafes Yapılar	17
2.2.1. Kafes yapı çeşitleri	19
2.2.2. Kafes yapıların tasarımındaki önemli parametreler	25
2.3. SLM ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri	26
2.4. Deneysel Çalışmalar.....	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1. Kafes Yapıların Tasarımı	32
3.2. Kafes Yapıların SLM ile Üretimi.....	33
3.3. Mekanik Testler ve Mikroyapısal Karakterizasyon	36
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	38
4.1. Mikroyapısal Karakterizasyonu Sonuçları (Numunelerin Üretim Sonrası SEM	

Görüntüleri).....	39
4.2. Kafes Yapıların Deneysel Basma Testleri Sonuçları	42
4.2.1. BCCZ-BCCZZ Yapı;	44
4.2.2. FCCZ-FCCZZ Yapı;	48
4.2.3. Farklı Kafes Yapılarının Davranış Karşılaştırılması;.....	51
4.3. Numunelerin Deneysel Test Sonrası SEM Görüntüleri	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması [27]	8
Çizelge 2.2. Alüminyumun sahip olduğu özellikler [52]	15
Çizelge 2.3 (a) Farklı kafes yapıları için Maxwell sayıları. (<i>FBCCZ</i> : Ekstra dikmeli hacim yüzey merkezli kübik, <i>F₂B₂CCZ</i> : X, Y ve Z yönlerinde ilave dikmeler olan hacim yüzey merkezli kübik) [95] (b) Bazı kafes yapılar ve deformasyon tipleri [95]	22
Çizelge 2.4. Üçlü periyodik minimum yüzey formülleri [78, 96].	23
Çizelge 3.1. Toz kimyasal kompozisyonu (% Ağırlıkça)	34
Çizelge 4.1. Üretilen kafes numunelerin en, kalınlık, yükseklik ve kütle ölçüm sonuçları.	39
Çizelge 4.2. Üretilen numunelerin deneysel çap ölçümleri	41
Çizelge 4.3. Kafes yapılar için deneysel sonuçlar	45

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalatın tarihsel gelişimi [23]	5
Şekil 2.2. Prototip üretim süreci [26].....	6
Şekil 2.3. Eklemeli imalat (3B baskı) işlem adımları [27]	7
Şekil 2.4. LOM sistem şematiği ve imal edilmiş parçalar [29,30]	9
Şekil 2.5. DED sistem şematiği ve imal edilmiş parça [31]	9
Şekil 2.6. EBM sistem şematiği ve imal edilmiş parçalar [33].....	10
Şekil 2.7. SLM sistem şematiği ve imal edilmiş parçalar [36, 37].....	11
Şekil 2.8. DED ile 3 katmanlı olarak imal edilmiş östenitik paslanmaz çelik (316L) için kesit görüntüsü [46]	13
Şekil 2.9. DED yöntemi ile imal edilmiş Ti-6Al-4V için bölgeye bağlı içyapı görüntüleri a) α - fazlı tane sınırları ince lamelli Widmanstaätten yapısı (alt kısımdan) b) Daha kaba bir yapı (üst kısımdan) [50]	14
Şekil 2.10. Stokastik hücreli malzemeler, a) açık hücreli alüminyum [78], b) kapalı hücreli alüminyum [85] ve c) açık hücreli stokastik bakır [86].....	20
Şekil 2.11. Dikme-tabanlı kiriş yapılar; a) BCC [87], b) BCCZ [87], c) FCC [87], d) FCCZ [35], (p) Üçgen Prizma [92], (q) Altıgen Prizma [90], (r) Sekizgen Prizma [90], (s) Sekiz Yüzlü Küp [90], (t) Eşkenar Dörtgen Yüzeyli, Sekiz Yüzlü Küp [90], (u) Kesilmiş Küp [90], (v) Kesilmiş Sekiz Yüzlü [90], (y) Kesilmiş Sekiz Yüzlü Küp [90], (z) Auxetic Kafes Yapı [91].	21
Şekil 2.12 Kabuk kafes yapılar; a) BCC, b) BCC-FCC, c) FCC [78].	23
Şekil 2.13. ÜPMY kafes yapılar; (a) Primitif [99], (b) IWP [32], (c) Neovius [99], (d) Gyroid[99], (e) Fischer-Koch S [99], (f) CLP [99], (g) C(Y) [100], (h) Elmas [1	
Şekil 2.14. (a) Kafes yapı çubuk yüzeyi SEM görüntüleri (b) Kafes yapı yüzeyinin yüksek büyültmeli SEM görüntüleri [104].....	27
Şekil 2.15. Farklı çaplarda ve eğim açılarında üretilen konsol dikmeler [126].....	30
Şekil 2.16. SLM eklemeli imalat sırasında ısı transferinin şeması [132]	31
Şekil 3.1. Kafes yapılarının birim hücresi ve boyutları (a) BCCZ-0,5 (b) BCCZZ-0,4 (c) BCCZZ-0,5 (d) BCCZZ-0,5.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Kafes yapılarının birim hücresi ve boyutları (a) FCCZ-0,5 (b) FCCZZ-0,4 (c) FCCZZ-0,5 (d) FCCZZ-0,5	33
Şekil 3.3. Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg metal tozu parçacıklarının SEM görüntüsü	34
Şekil 3.4. ERMAKSAN EnaVision 250 SLM cihazı	35
Şekil 3.5. SLM yöntemi ile üretilen kafes yapıların bir seti	35
Şekil 3.6. SLM ile üretilen kafes yapı numuneleri (a) BCCZ-0,5 (b) BCCZZ-0,4 (c) BCCZZ-0,5 (d) BCCZZ-0,5.....	35
Şekil 3.7. SLM ile üretilen kafes yapı numuneleri (a) FCCZ-0,5 (b) FCCZZ-0,4 (c) FCCZZ-0,5 (d) FCCZZ-0,5	36
Şekil 3.8. AXIS AGN220C Analitik Hassas Terazı	36
Şekil 3.9. (a) Shimadzu Autograph AGIS-100 kN üniversal mekanik test cihazı, (b) Uygulanan basma testine örnek	37
Şekil 3.10. TESCAN MIRA3 XMU markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	37
Şekil 4.1. SLM tarafından üretilen numunelerin yüzey morfolojisi (a) BCCZ-0,5 (b)BCCZZ	
Şekil 4.2. (a) BCCZZ-0,5 kafes yapıdaki çubuk çapının ve çubuk yüzey tabakasının yüzeylerinin değişimi (b) FCCZZ-0,5 kafes yapıdaki çubuk çapının ve çubuk yüzey tabakasının yüzeylerinin değişimi (c) Kafeslerinin erimemiş veya kısmen erimiş toz parçacıklarına odaklanan dikmelerin büyütülmüş bir görünümü	41
Şekil 4.3. BCCZ-BCCZZ yapılarının gerilme-gerinim grafiği.....	43
Şekil 4.4. FCCZ-FCCZZ yapılarının gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	44
Şekil 4.5. BCCZ-0,5 numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerinmelerdeki şekil değiştirme örnekleri.....	46
Şekil 4.6. BCCZZ-0,5 numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerinmelerdeki şekil değiştirme örnekleri.....	47
Şekil 4.7. 0,15 gerinmesindeki şekil değiştirme örnekleri (a) BCCZ-0,5 kafes yapısı (b) BCCZZ-0,5 kafes yapısı (c) BCCZZ-0,6 kafes yapısı.....	48
Şekil 4.8. FCCZZ yapı gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerinmelerdeki şekil değiştirme örnekleri.....	50
Şekil 4.9. 0,15 gerinmesindeki şekil değiştirme örnekleri (a) FCCZ-0,5 kafes yapısı (b) FCCZZ-0,5 kafes yapısı (c) FCCZZ-0,6 kafes yapısı (d) FCCZZ-0,6 SEM	

Şekil**Sayfa**

görüntüsü, (e) FCCZZ-0,6 düğüm noktası deformasyonuna odaklanılmış görüntü51

Şekil 4.10. Farklı kafes yapıların birbiri ile karşılaştırılması.....52

Şekil 4.11. (a) Katı kafes çubuklarının deformasyon sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü, (b) (a)'da çizgili dikdörtgen ile gösterilen bölgenin büyütülmüş resmi.....53



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

d	Çubuk çapı
E	Elastisite modülü
F	Ölçülen kuvvet değeri
L_0	Hücrenin ilk boyu
m	Düğüm sayısı
M	Maxvel sayısı
S	Çubuk sayısı
ΔL	Hücrenin değişen uzunluğu
ρ^* / ρ_s	Bağıl yoğunluk
ρ^*	Malzeme yoğunluğu
ρ_s	Ana malzemenin yoğunluğu
σ	Normal gerilme
A_0	Birim hücrenin yüzey alanı

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	Üç boyutlu
BCC	Hacim merkezli kübik
BCCZ	Dikey çubuk destekli hacim merkezli kübik
BCCZZ	Ekstra dikey çubuklu hacim merkezli kübik
CNC	Bilgisayarlı sayısal kontrol
DED	Direkt Enerji Depolama
EBM	Elektron ışınli ergitme
FCC	Yüzey merkezli kübik
FCCZ	Dikey çubuk destekli yüzey merkezli kübik
FCCZZ	Ekstra dikey çubuklu yüzey merkezli kübik
LOM	Lamine Nesne İmalat

MJF	Çoklu jet füzyon
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLM	Seçici lazer ergitme
STL	Stereolithography
ÜMPY	Üçlü Periyodik Minimum Yüzey



1. GİRİŞ

İmalat, hammadde ve yarı mamüllerin makineler ve işçilik kullanılmasıyla dönüştürülerek ürün elde edilmesi sürecidir [1]. İnsanoğlu tarih boyunca çeşitli imalat teknikleri kullanmış ve bu teknikleri ihtiyaçlarına göre geliştirmiştir. Üretim yöntemleri geleneksel ve geleneksel olmayan olarak ikiye ayrılır. Geleneksel yöntem, kesici uçlar, matkap uçları ve taşlama taşları gibi aletler kullanılarak fiziksel temas yöntemleriyle makro işlemdir. İmalat süreçleri, talaşlı imalattan farklı olarak malzeme ekleyerek kesmesiz imalat teknikleri (plastik kalıplama, 3 boyutlu imalat, kaynak, döküm vb.) olarak tanımlanır. Günümüzde nüfus artışı ve teknolojik gelişme ile birlikte her geçen gün daha fazla özel ihtiyaç ürünlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Eklemeli üretim süreçleri, geleneksel süreçlere kıyasla daha hızlı ve daha uygun maliyetli üretimin yanı sıra daha karmaşık geometrilerin sorunsuz bir şekilde üretilmesini sağlar.

3 boyutlu üretim olarak da bilinen eklemeli imalat, plastik, seramik, metal ve kompozitler dahil olmak üzere çeşitli malzemelerden bilgisayarla tasarlanmış parçaların katmanlar eklenmesiyle oluşan bir üretim sürecidir. Bu teknoloji, karmaşık geometrilere sahip parçaların uygun bir fiyata üretilmesini mümkün kılar. Bazı eklemeli imalat proseslerinin maliyetleri daha yüksektir, ancak bu maliyetler alternatif proseslerle üretilemeyen parçaların üretimini mümkün kıldığı için göz ardı edilmektedir.

Eklemeli imalat, eksiltici imalat yöntemlerinin aksine, üç boyutlu bir modele göre bir parça üretmek için malzemeleri katman katman birleştirme işlemidir [2]. Metal eklemeli imalat genellikle toz, tel, levha vb. 3 boyutlu bir modele göre bir kalıpta katman üzerine katman eklenerek yapılan metal malzemelerin yapıştırılması işlemidir [3]. Bu imalat yöntemi karmaşık yapılı veya özel imal edilecek parçaların, takım aletlerine, preslere, kalıplara veya döküm kalıpları gibi bileşenlere ihtiyaç duymadan doğrudan üretimine izin verir [4]. Bu da bileşenlerin nihai kaliteye yakın üretildiği anlamına gelir. Eklemeli imalatın en büyük avantajı tasarım ve imalat aşamalarında sunduğu geometrik özgürlüktür. Karmaşık şekilli parçalar, geleneksel işleme yöntemlerinin veya ticari araçların sınırlamaları olmaksızın tek adımda tasarlanacak şekilde üretilebilir. Karmaşık topolojik yapılara sahip kafes malzemelerinin geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmesi nadiren veya

çok zordur. Yüksek özgül mukavemetleri, sertlikleri ve enerji absorpsiyonları nedeniyle, kafes geometrileri çeşitli uygulamalarda en çok tercih edilen gözenekli yapılardandır.

Kafes yapısı, birim hücrelerin tekrar eden bir düzenlemesiyle oluşturulan üç boyutlu bir açık hücre yapısıdır [5]. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik en büyük adımlardan biri kafes yapılarının kullanılması olmuştur. Bu nedenle hem yalıtım özellikleri hem de düşük yoğunluk ve yüksek mukavemetleri kafes yapılarını önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Tüm bu özellikler kafes yapıları akustik, implantlar, nakliye, paketlenme ve havacılık alanlarında da kullanılır hale getirmiştir. Eklemeli imalat proseslerinin geliştirilmesi, kafes yapıların imalat zorluklarının üstesinden gelinmesinde büyük rol oynamıştır. Seçici lazer ergitme (SLM) [6, 7], lazer sinterleme [8-10], ultrasonik eklemeli imalat [11-13], eriyik yığılma modellemesi (FDM) [14, 15] vb. birçok eklemeli imalat gelişimine paralel olarak, mikro ve makro ölçekte oldukça karmaşık topolojilere sahip hücresel malzemeler üretmek mümkündür. Eklemeli üretim süreçleri daha çeşitli hale geldikçe, kafes yapılarını imal etmek için kullanılabilecek malzemeler de geliştirilmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisi, plastikler, seramikler, kompozitler ve metal alaşımları gibi iyi bilinen malzemelerin yanı sıra macun, alçı ve beton gibi özel malzemelerin üretimine izin verir. Ancak çoğu üründe hammadde olarak metaller ve alaşımlar kullanılır. Bu hammaddeler arasında alüminyum alaşımları önemli bir yer tutmaktadır. Alüminyum alaşımları hafif, ucuz ve yüksek ısı iletkenliğine sahip oldukları için havacılık, uzay, otomobil, ev aletleri gibi hayatımızın her alanında yer almakta ve bu nedenle eklemeli imalat malzemeleri içerisinde önemli bir yer işgal etmektedir. AlSi10Mg alaşımı, SLM ile yaygın olarak üretilen birkaç alüminyum alaşımından biridir [16]. Ötektik bir alaşım olduğu için dar bir katılaşma sıcaklık aralığına sahiptir ve bu özellik SLM yöntemi ile çatlaksız parça üretimine olanak sağlar [17].

Çalışmada, dikey destekli hacim merkezli kübik (BCCZ) ve dikey destekli yüzey merkezli kübik (FCCZ) yapılarına kıyasla ek dikey destekler içeren yeni tasarımlar oluşturmaya odaklanılmıştır. Ayrıca FCCZZ ve BCCZZ yapılarında birim hücrenin çubuklarının çapları değiştirilerek mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Yeni tasarımlarımızla özgül mukavemeti

ve elastisite modülünü arttırmaya yönelik bir hedef doğrultusunda, hafif uygulamalarda daha iyi bir performans elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan geometriler AlSi10Mg tozlarından SLM kullanılarak üretilmiştir. Bu parametrelerin geometrik doğruluk ve mikroyapı üzerindeki önemli etkisinden dolayı işleme parametrelerinin seçimi zor olabilir. Lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama aralığı parametreleri, bir SLM işleminde üretim numuneleri üzerindeki enerji yoğunluğunu ayarlamak için ana dört değişkendir. Bu nedenle üretimin başarısı için bu parametre setinin optimum seçimi yapılmalıdır. AlSi10Mg, SLM tarafından üretilen en yaygın alaşımlardan biri olduğundan, makine üreticileri hâlihazırda geliştirdikleri bu alaşım için en uygun parametre setlerini tüketicilere sunmaktadır. Bu çalışmada da cihaz üreticisi tarafından sunulan parametre kombinasyonu bu çalışmada kullanılmıştır. Daha sonra üretilen numunelerin kalitesi makro ve mikro gözlemlerle değerlendirilmiştir.

Üretilen kafes numunelerinin mekanik özellikleri hakkında temel bilgiler, yarı statik tek eksenli basma testi ile belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak hasar dayanımı ve elastik rijitlik değerleri elde edilmiş ve tasarlanan geometrilerin ağırlıkları dikkate alınarak bu yapıların mekanik performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, parçaların mekanik tepkilerini daha iyi değerlendirmek için testler sırasında numunelerin görüntüleri kaydedilmiş ve deformasyon davranışları karşılaştırmalı bir şekilde irdelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

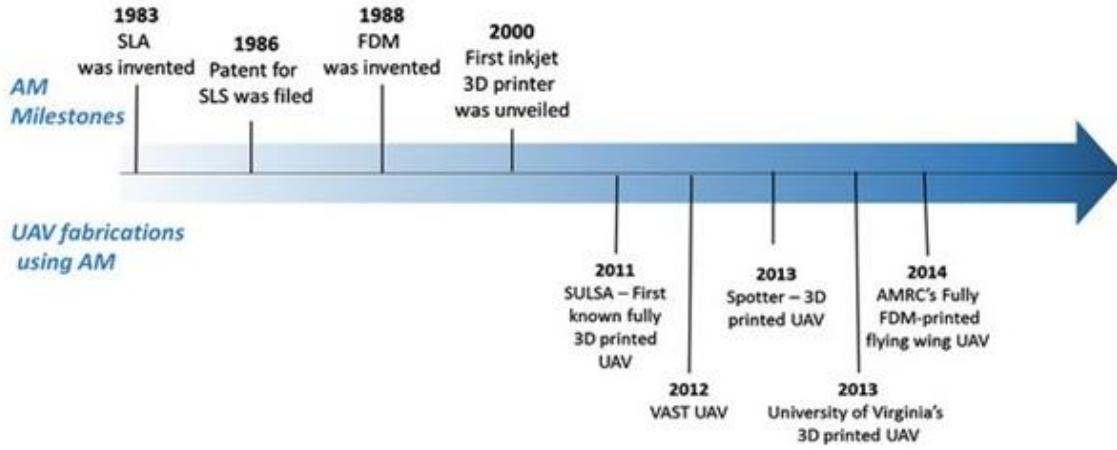
Bu bölümde, tezin araştırma alanlarını oluşturan eklemeli imalat yönteminden, üretim prensibinden, metal eklemeli imalat yöntemlerinden, eklemeli imalatta kullanılan toz malzemelerden, AlSi10Mg alaşımından, kafes yapılardan, kafes yapı çeşitlerinden, kafes yapıları tasarımındaki önemli parametrelerden, SLM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinden ve literatürdeki çalışmalardan bahsedilecektir.

2.1. Eklemeli İmalat

Günümüzde "üç boyutlu (3B) yazıcı" olarak bilinen bu teknolojinin tarihsel gelişimi Şekil 2.1.'de verilmiştir. Aslında 1970'lerde tasarım örnekleri oluşturmak için hızlı prototipleme olarak tasarlanmıştır. 1980'li yılların başından itibaren numune yerine gerçek ürün üretmeye odaklanılmıştır. 1990'larda bu imalat yöntemine "eklemeli imalat" adı verilmiş, metal ve seramikten kullanıma hazır doğrudan fonksiyonel parçalar üretilmiştir [18, 19]. Eklemeli imalat, karmaşık geometrilere sahip fiziksel parçaları hızla üretmek için malzemenin katman katman eklenmesiyle üç boyutlu (3B) geometri verilerini kullanan bir üretim tekniğidir.

İlk prototip 1980 yılında yapılmış ve eklemeli imalat makinesi ilk olarak imalat sisteminde kullanılmıştır. 1984 yılında, bilgisayar destekli tasarımın STereoLithography (STL) yöntemi 3D Systems firmasından Chuck Hull tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Bu teknik, birbirine bağlı üçgen düzlemlerle her türlü üç boyutlu geometriyi temsil etmek için bir ultraviyole lazer ışını ile fotopolimeri şekillendirir.

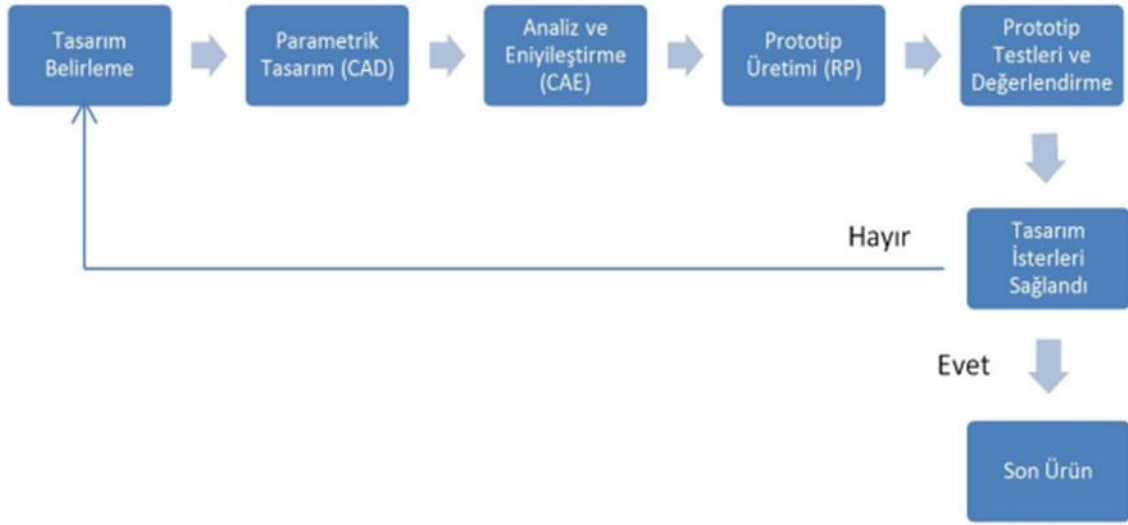
İlk olarak ışığa duyarlı bir termoset polimer malzemenin lazer ışını kullanılarak katmanlar halinde katılaştırılmasını sağlayacak 3B polimer yazıcı üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmanın başarılı olması metal parçaların üretimi için de bir öncü olmuştur. Yine lazer ışını yardımıyla metal tozların eritilmesini sağlayabilecek metal yazıcılar geliştirilmiştir [20-22].



Şekil 2.1. Eklemeli imalatın tarihsel gelişimi [23]

İlk zamanlarda prototip üretmek için kullanılan eklemeli üretim süreci Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu yöntem birçok avantajı nedeniyle zaman içinde endüstrinin ilgisini çekmiştir. Eklemeli üretim, geleneksel kalıplar, kalıplar, frezeleme ve işleme ile inşa edilmesi çok zor veya çok pahalı olacak hafif, karmaşık tasarımların oluşturulmasını sağlar. Eklemeli imalat, hızlı prototiplemede de iyidir. Dijitalden dijital süreç, geleneksel ara adımları ortadan kaldırarak değişikliklerin anında yapılmasına olanak tanır. Geleneksel prototiplemenin nispeten tekrarlı çalışmasıyla karşılaştırıldığında, eklemeli imalat daha dinamik ve tasarım odaklı bir süreç sunar. Eklemeli imalat ister prototipleme ister imalat için kullanılsın, teslim sürelerini genellikle kısaltır. Bu teknoloji ile bazı jet motoru parçalarının teslimat süreleri bir yıldan fazla kısaltılmıştır. Ayrıca, bir zamanlar birden çok alt montajdan yapılan parçalar artık tek bir monte edilmemiş nesne olarak üretilebilmektedir. Mühendisler, köprülerden gökdelenlere kadar her şeyi tasarlarken uzun süredir ağırlığı en aza indirmeye gücü en üst düzeye çıkarmaya çalıştılar. Eklemeli üretim, tasarımcıların organik yapı yoluyla nesnelerin ağırlığını büyük ölçüde azaltma hayallerini gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır [23].

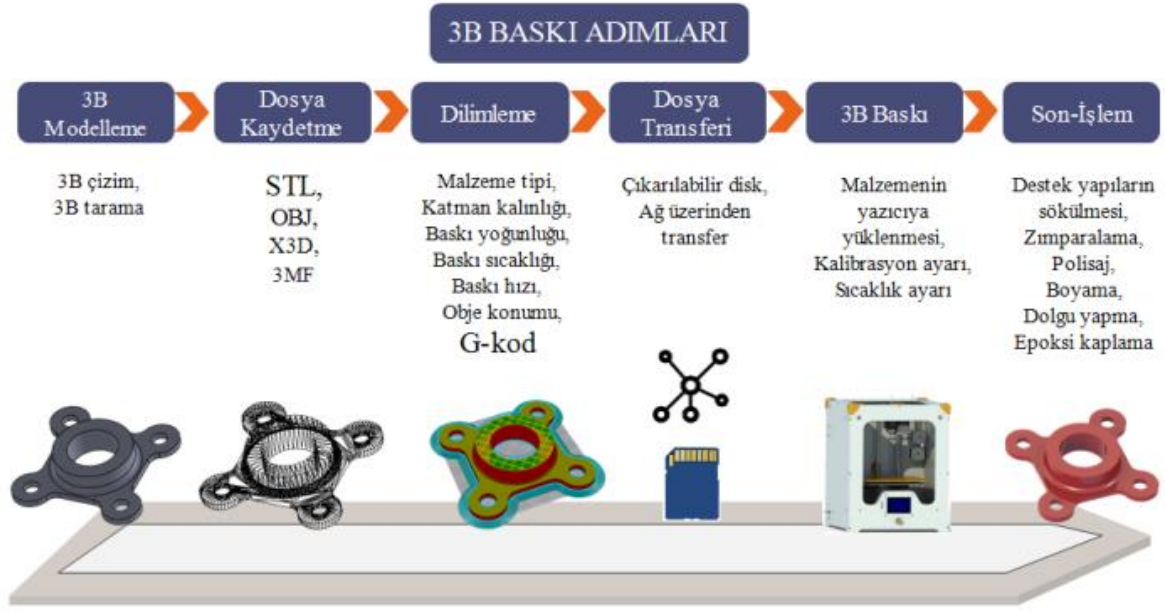
Ek olarak, karmaşık geometrilere sahip küçük yapısal veya fonksiyonel parçaların başarılı bir şekilde üretilmesi için eklemeli imalat süreçleri kullanılabilir. Zaman ve para tasarrufu, diğer üretim süreçlerine göre %50-90 oranında değişmektedir [24, 25]. Katmanlı üretim, otomotiv, havacılık, biyomedikal ve enerji sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Prototip üretim süreci [26]

2.1.1. Eklemeli imalat üretim prensibi

Pek çok farklı teknolojiyi bünyesinde barındıran 3B baskı, dijital ortamda tasarlanan nesnelerin eklemeli imalat kullanılarak fiziksel nesnelere dönüştürülebildiği pratik bir üretim yöntemidir. 3B baskının temel mantığı olan eklemeli üretim, CNC frezeleme ve tornalama gibi bilgisayar destekli üretim süreçlerini destekleyen işleme sürecinin tersidir. İşlemede, bir malzeme bloğundan parçaları keserek ve çıkararak üç boyutlu bir nesne elde ederken, 3B baskı işleminde, tasarlanmış üç boyutlu bir nesne oluşturmak için malzeme katman katman eklenerek birleştirilir. Sonuç olarak, daha az malzeme kullanarak 3B nesneler oluşturmak için eklemeli üretim süreçleri kullanılabilir. 3B baskı teknolojisinin tercih edilmesinin temel nedeni, üretim hatlarının kurulması veya kalıpların yapılması gibi ek üretim adımlarına gerek kalmadan tasarımın hemen üretilebilmesidir. Hat kurulumuna veya kalıplara ihtiyaç duymadan tasarımdan üretime geçişi sağlayan 3B baskı işlemi Şekil 2.3'te görüldüğü gibi genel olarak altı temel adımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Eklemeli imalat (3B baskı) işlem adımları [27]

Bu adımların her biri; üretilecek parçanın 3B modelini dijital olarak görüntülenmesi, model dosyasını dilimleyip yazılımına uygun bir dosya formatına dönüştürme, modeli dilimleme yazılımına aktarma, G kodunu çıkarmak için dilimleme, G kodunu 3B yazıcıya aktarıp 3D yazıcının baskı ve baskı için hazırlanması, fiziksel bir nesnenin başlatılması ve elde edilmesi nihai olarak elde edilen nesnenin destek yapısından temizlenmesi ve son işlem adımlarının uygulanmasından oluşur.

2.1.2. Eklemeli imalat (3B baskı) teknolojileri

Sık kullanılan eklemeli imalat teknolojileri Çizelge 2.1’de kategorilere ayrılarak verilmiş ve teknolojilere ait başlıca özellikler belirtilerek karşılaştırmaları yapılmıştır [27].

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması [27]

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

Çizelge 2.1’de verilen eklemeli imalat teknolojilerinden metal eklemeli imalat ile ilgili olanlar bu bölümde açıklanmıştır.

Lamine Nesne İmalatı (LOM)

Sistemin önemli bileşenleri; yapı platformu üzerine levha ilerleten bir besleme mekanizması, levhayı alttaki katmanlara bağlayan ısıtılmış silindirler ve her levha katmanında bileşenlerin dış hatlarını kesen bir lazer vardır (Şekil 2.4). Parçalar, yapışkan kaplı sac malzemenin önceki katmanlara yapıştırılması, kesilmesi ve istiflenmesi ile

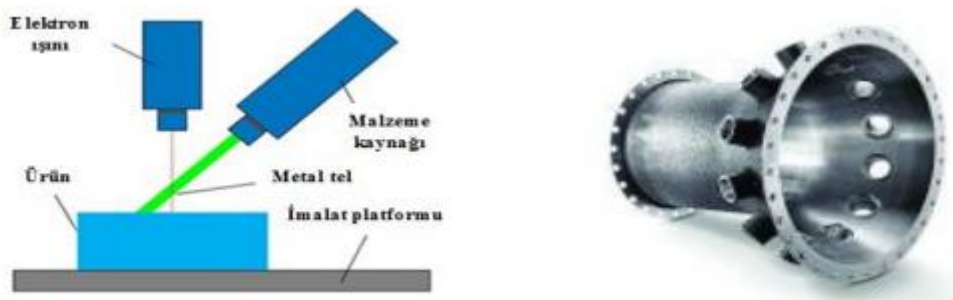
yapılır. Bir lazer, her katmanın dış kısmını keser. Her kesme işleminden sonra platform, döşeme kalınlığına (tipik olarak 0,002 ila 0,020) eşit bir derinliğe indirilir ve bir önceki döşeme üzerine başka bir döşeme ilerletilir. Bu platform daha sonra hafifçe yükseltilir ve ısıtılmış silindirler yeni tabakayı yapıştırmak için basınç uygular. Lazer ile dış kısmı parçanın dış hatlarına kadar kesip parça bitene kadar işlem tekrarlanır. Sac metal kesildikten sonra kalan malzeme parçayı desteklemek için yerinde kalır [28].



Şekil 2.4. LOM sistem şematiği ve imal edilmiş parçalar [29,30]

Doğrudan Enerji Depolama (DED)

Doğrudan enerji depolama (DED), malzemeyi ergiterek parçaların oluşturulması prensibine dayanmaktadır. DED' in sistematığı Şekil 2.5'de görüldüğü üzere, ekstrüzyon prensibine benzer olarak çok eksenli hareket kabiliyetine sahip bir ağızlıktan, tel veya toz formdaki malzeme imalat platformuna aktarılır ve lazer/elektron ışını ile ergitilerek katılaştırılmaktadır.

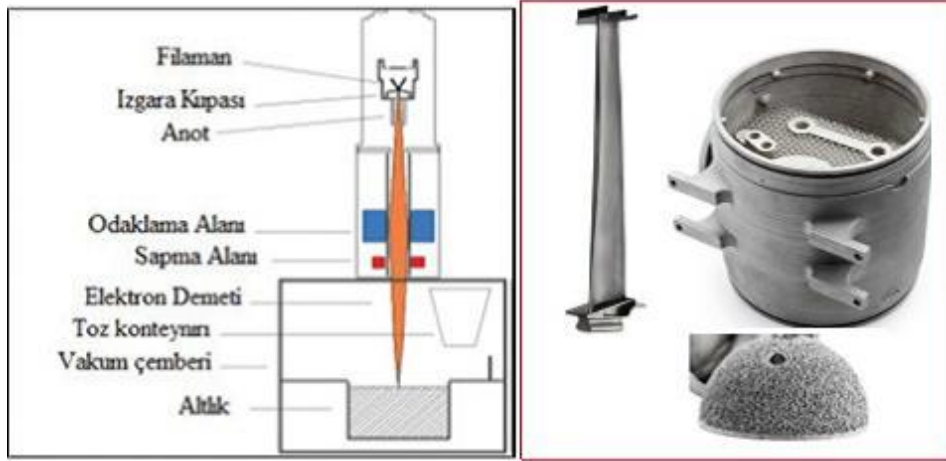


Şekil 2.5. DED sistem şematiği ve imal edilmiş parça [31]

Toz Yataklı Sistemler

Elektron ışınlı ergitme (EBM)

EBM teknolojisi, bir metal tozunun veya filamanın, yüksek enerji ve sıcaklık sağlayan odaklanmış bir elektron ışını tarafından yüksek basınçlı atmosfer altında tamamen eritilmesi ilkesine dayanmaktadır ve sistem şeması Şekil 2.6’te verilmiştir [32]. Geometrik veriler dikkate alınarak, platform tarafından seviye bazında alçaltılmış, metal tozu ile kaplanmış ve her indirildiğinde yeni bir katman eklenmiş bir erimiş toz tabakası elde edilir ve ergitme işlemini tekrarlanır. Tüm katmanları birleştirilerek, 3B nesne oluşturulur. EBM teknolojisinde vakum ortamı elektronların gaz molekülleri ile çarpışmasını engellerken aynı zamanda reaktif metallerin işlenmesine de olumlu etki yapar. Aynı zamanda, önemli miktarda enerji tüketimi önlenir. EBM, yüksek mukavemetli parçaların üretimi için oldukça tercih edilen bir tekniktir.

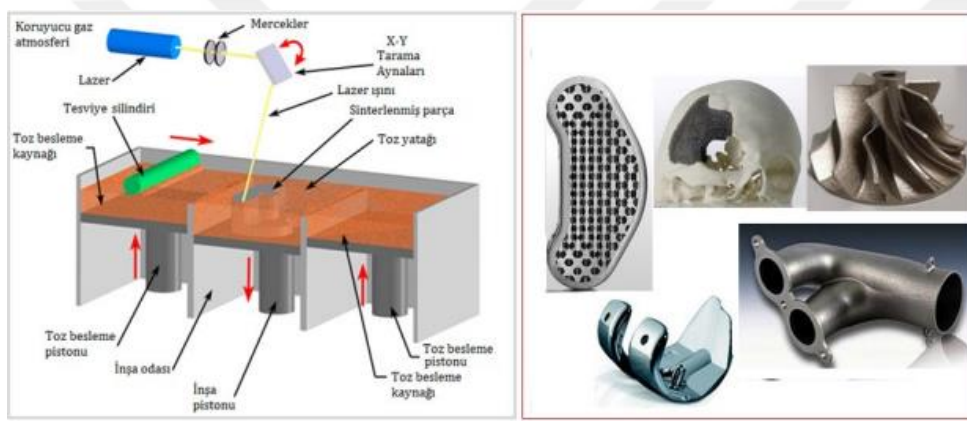


Şekil 2.6. EBM sistem şematığı ve imal edilmiş parçalar [33]

Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM)

Seçici lazer ergitme (SLM), seçici lazer sinterleme teknolojisine çok benzeyen bir eklemeli üretim teknolojisidir. SLM, sinterleme yerine tam bir ergitme işlemi gerçekleştirir [34]. SLM dijital ortamda üretilen üç boyutlu verileri bir enerji kaynağı olan lazer ışığını

kullanarak küçük küresel tozlardan üç boyutlu metalik malzemeler üreten bir eklemeli üretim yöntemidir [35]. Şekil 2.7’de sistem şeması verilmiştir. SLM yönteminin üretim süreci, toz dağıtım ünitesi kullanılarak tozun baskı ünitesine serilmesiyle başlar. Yukarıdan yönlendirilen bir lazer ışını, bilgisayar ortamında kesilen parçanın konumuna uygun yerlerde tozu eritir. Daha sonra toz dağıtım ünitesi yüzeye yeni bir toz katmanını serer ve aynı işlem tekrarlanır. Parçaların üretimi tamamlandıktan sonra tozlanan parçalar temizlenir. Bu teknoloji havacılık ve tıp endüstrilerinde popülerdir, ancak yüksek maliyeti onu ev kullanıcıları için uygun hale getirmez. SLM teknolojisinde en yaygın olarak titanyum, paslanmaz çelik ve alüminyum gibi metal malzemeler kullanılır.



Şekil 2.7. SLM sistem şematığı ve imal edilmiş parçalar [36, 37].

SLM yönteminin en önemli avantajlarından bazıları, karmaşık geometride ve hücresel yapı gibi hafifletirilmiş parçaların üretimine imkân sağlamasıdır [38]. Kafes yapı olarak üretilen parçalar, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek termal ve titreşim-akustik izolasyon sunar. Bu nedenle havacılık ve tıp gibi değerli endüstriyel alanlarda kullanım alanı genişlemektedir [39].

2.1.3. Eklemeli imalatta kullanılan toz malzemeler

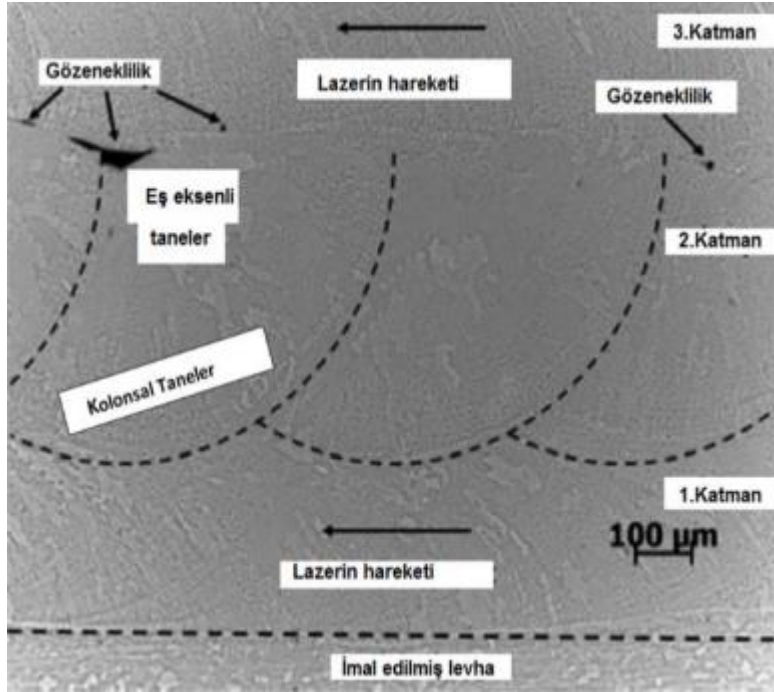
Geleneksel üretim süreçlerinde malzemeler çıkarma ile oluşturulurken, eklemeli üretim bu süreçlerin aksine ürünün ana malzemesinin katman katman çoğaltılması ilkesine dayanır [40]. Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan malzemeler, malzemelerin aynı anda

bağlanması ve katılaştırılması için hammadde olarak kullanılan, odaklanmış bir ısı kaynağı tarafından seçici olarak ergitilerek parçalar oluşturan tozlar veya tel biçimindedir [41, 42].

Çelik, alüminyum ve titanyum gibi bazı malzemeler için güvenilir, yüksek yoğunluklu parçalar üretmek maksadıyla eklemeli imalat yöntemi süreçleri ve gelişmiş teknikler kullanılabilir [43]. Eklemeli imalat işleminde kullanılan metal tozlarının çoğu, yaygın olarak bilinen metal tozu imalat teknikleri kullanılarak üretilmektedir. Bu yöntemler su, gaz veya plazma atomizasyonudur. Genel olarak, eklemeli imalat prosesleri, homojen toz dağılımı sağlamak sebebiyle iyi akışkanlık ve yüksek özgül ağırlıkta bir toz yatağı oluşturmak için iyi paketleme özellikleri gerektirir. Kullanılan tozun özellikleri, üretilen parçaların yoğunluğu ve gözeneklilik gibi özelliklerini etkiler [44].

Çelikler

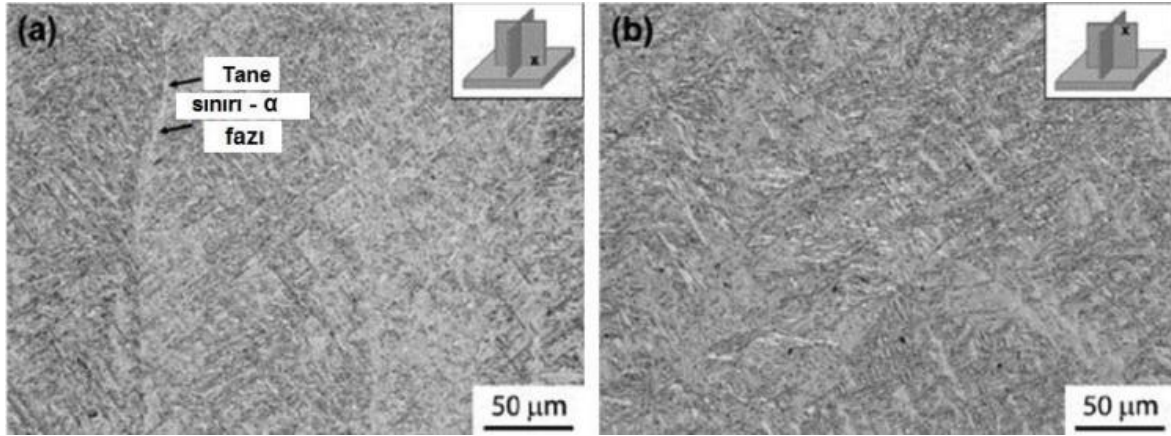
Çelik hala en yaygın kullanılan yapı malzemesidir [45]. Bu nedenle çeliğin eklemeli imalat için de çok ilginç bir malzeme olduğu açıktır. Literatür ayrıca direkt enerji depolama (DED) için östenitik paslanmaz çeliklerin (316L) [46-48] ve takım çeliklerinin (H13) [49] kullanımından bahseder. Şekil 2.8’de, üç katman olarak DED ile yapılmış bir östenitik paslanmaz çeliğin (316L) bir kesitini göstermektedir [46]. Kesit görüntünde lazer izleri de tespit edilmiştir.



Şekil 2.8. DED ile 3 katmanlı olarak imal edilmiş östenitik paslanmaz çelik (316L) için kesit görüntüsü [46]

Titanyum ve Alaşımları

Ti ve Ti alaşımları, eklemeli imalat prosesleri için büyük ilgi görmektedir. Ti, geleneksel işlemede yüksek işleme maliyetleri ve uzun teslim süreleri ile yüksek performanslı parçalarda endüstriyel uygulamalara sahiptir. Ti-6Al-4V parçalarını imal etmek için SLM, EBM ve DED yöntemleri başarıyla uygulanmıştır [50]. DED yöntemi ile imal edilmiş Ti-6Al-4V için bölgeye bağlı içyapı görüntüleri Şekil 2.9’da verilmiştir. Eklemeli imalatla genellikle çeşitli alaşım bileşimleri ve ilgili mikro yapılar yer alır ve bunlara Ti'nin allotroplarındaki yüksek sıcaklık gradyanları ve karmaşık termal döngüler eşlik eder. Eklemeli imalat ile Ti bazlı alaşımlarda mikroyapısal değişiklikler ve özellikler arasındaki ilişki, en ilginç araştırma konularından biri haline gelmiştir.



Şekil 2.9. DED yöntemi ile imal edilmiş Ti-6Al-4V için bölgeye bağlı içyapı görüntüleri
a) α - fazlı tane sınırları ince lamelli Widmanstaätten yapısı (alt kısımdan) b)
Daha kaba bir yapı (üst kısımdan) [50]

Alüminyum Alaşımları

Eklemeli imalat için sınırlı sayıda farklı Al alaşımının mevcut olmasının nedeni, titanyumdan farklı olarak alüminyumun işlenmesinin kolay olması ve Al parçalarının maliyetinin nispeten düşük olmasıdır [51]. Alüminyum elementinin sahip olduğu özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Alüminyum (Al) doğal olarak oksitlenen bir element olup, Oksijen (O) ve silikondan (Si) sonra doğada bulunan en yaygın üçüncü elementtir. Yerkabuğunun ağırlığının %8’ini oluşturur. Alüminyumun diğer elementlere göre birçok avantajı vardır [52]. Bu avantajlar şunlardır:

Hafiflik: Alüminyumun yoğunluk değeri $2,74 \text{ g/cm}^3$ ’tür. Alaşımlı çeliğe göre neredeyse 1/3 daha hafif metaldir [53].

İletkenlik: Isı ve elektriği altın, gümüş ve bakır gibi metallerden sonra iletir. Altın, gümüş ve bakırdan daha hafiftir, uzun mesafe güç ve enerji iletiminde, otomotiv endüstrisinde, radyatörlerde ve iklimlendirmede avantajlara sahiptir. Isı iletimi açısından, bakırın (Cu) %60’ı kadardır. Bu farklılık dolayısıyla otomotiv endüstrisinde silindir kapakları başta olmak üzere elektrikli ısıtıcılar, reküperatörler ve evaporatörlerde kullanımının artmasına neden olmaktadır [54].

Şekillendirme: Kristal yapısı sayesinde geleneksel imalat yöntemi olan döküm başta olmak üzere plastik kalıplama yöntemleri haddeleme, dövme, kesme, bükme, ekstrüzyon gibi işlemlerle kolaylıkla şekillendirilebilir [55].

Korozyon direnci: Alüminyum, oksijen ile birleşerek çok kolay bir şekilde pasif bir tabaka oluşturur. Oksijen ile kombinasyon halinde oluşturulmuş yaklaşık 10 angstrom (Å) kalınlığında bir alüminyum oksit (Al_2O_3) oksit tabakası ile kaplanmıştır. Bu oksit tabakası, demir (Fe) ve magnezyum (Mg) gibi metallerin oluşturduğu tabakalar gibi büyümmez ve delaminasyon olmadan stabildir [56].

Geri dönüşüm işlevi: Alüminyum geri dönüştürülerek tekrar tekrar kullanılabilir. Çok az enerji ile neredeyse sıfır geri dönüşüm sağlar [57].

Mukavemet: Otomotiv endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının özgül dayanım oranı (kuvvet/yoğunluk) bazı çelik alaşımlarına göre daha yüksektir. Alüminyum alaşımlarının deformasyon sertleşmesi ve çökelme sertleşmesi ile mukavemeti artırılabilir. Bazı alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemi ile elde edilen mukavemet değerleri bazı çelik alaşımları ile rekabet edebilir [58].

Çizelge 2.2. Alüminyumun sahip olduğu özellikler [52]

Sembol	Al
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26.97
Yoğunluk (25 °C’de)	2,7 g/cm ³
Akma Mukavemeti	10-30 MPa
Sertlik (HB 2.5)	120-200 MPa
Elastisite Modülü	72 GPa
Kayma Modülü	27 GPa
Isıl Genleşme Katsayısı (25 °C’de)	23,1 µm/m.K
Özgül Isı	0.211 cal/g
Ergime Noktası	660°C
Kaynama Noktası	1800°C
Kafes Tipi	FCC

Alüminyuma İlave Edilen Alaşım Elementlerinin Etkileri

Teknik olarak saf alüminyum, yüksek elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Bununla birlikte, döküm özelliklerini iyileştirmek ve istenen malzeme özelliklerini sağlamak için çeşitli alaşım elementleri ile alaşımlanır [59]. Alüminyumda en yaygın olarak kullanılan alaşım elementleri bakır, silisyum, magnezyum, mangan, çinko, demir, krom, titanyum ve nikeldir [60, 61].

Silisyum: Silisyum, dökme alüminyum alaşımlarında en yaygın olarak kullanılan alaşım elementidir. Silisyum eklemek, sıvı metalin akışkanlığını artırarak kalıbın ince ve dar kısmında kolayca hareket etmesini sağlar [62]. Al-Si alaşımları, yüksek mekanik özellikleri ve dökülebilirlikleri nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [63, 64]. Alüminyuma silisyum eklenmesi, döküm alaşımlarının akışkanlığını artırır. Katılaşma aralığını, sıcak çatlama eğilimini, termal genleşme katsayısını ve alaşım yoğunluğunu azaltır. Silisyumun önemli bir avantajı, döküm malzemelerinde katılaşma nedeniyle hacimsel büzülmeyi (bir dezavantaj) en aza indirmesidir [65, 66].

Magnezyum: Alüminyum alaşımlarına eklenen elementel magnezyumun etkisi, alaşım elementi bakırinkine benzer. Magnezyum eklemek, alaşımın korozyon direncini, mukavemetini ve kaynaklanabilirliğini artırır, ancak sünekliği azaltır [67]. Al-Mg alaşımları, ısıtılabilir alaşımlar grubuna aittir ve yaşlandırma işlemi ile güçlendirilir. Yaşlandırma sürecinde ısıtılabilir süresi, sıcaklık ve kimyasal bileşim önemlidir. Al-Si-Mg alaşımları için, Mg_2Si çökeltilerek alaşımın gücü artırılır [68].

Al-Si-Mg Alaşımları

Al-Si-Mg alaşımları, yüksek mekanik özellikleri, özgül mukavemeti, ısıtılabilir geliştirilmesi, kaynaklanabilirliği ve korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [65]. Bu alaşım grubu, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Al-Si-Mg alaşım grubuna ait A356 alaşımı silindir

kapakları, transfer kutuları (dişliler), jantlar ve manifoldlar gibi parçalar için malzeme olarak kullanılır. Bu grup alaşımların çekme, darbe, yorulma ve aşınma direnci büyük önem taşımaktadır [69].

Malzemelerin mekanik özellikleri, parçacık boyutu, morfolojisi, ikincil fazların şekli ve boyutu gibi özellikler ile ilişkilidir. Alüminyum alaşımlarına eklenen alaşım elementleri mukavemeti artırır ve malzemenin ısıtma işlem özelliklerini ve çalışma ortam sıcaklığını belirler. Al-Si alaşımları endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan alüminyum esaslı alaşımlardır. Bu alaşım grubu içinde, ötektik altı alaşım AlSi10Mg, dar katılma aralığı, iyi dökülebilirlik, iyi kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci nedeniyle öne çıkmaktadır. AlSi10Mg alaşımı kütleye %9-11 Si ve %0,4-0,6 Mg içerir. Si ve Mg'nin yoğunluğu alüminyuma göre daha düşük olduğundan Al alaşımlarına eklenen Si ve Mg elementleri alaşımların yoğunluğunu azaltır [61, 70, 71]. Ayrıca, alüminyum alaşımlarına Si ve Mg alaşım elementlerinin eklenmesi, ısıtma işleminin bir sonucu olarak 1:2 intermetalik oluşumuyla sonuçlanır, bu da mukavemeti artırır.

2.2. Kafes Yapılar

Kafes yapısı, bir veya daha fazla tekrar eden birim hücreden oluşan üç boyutlu bir yapıdır. Her hücre, düğümlerde birbirine bağlı dikey çizgilerden oluşur [72]. Bu yapılar literatürde hücresel katı yapı, hücresel metaloid, hücresel köpük yapı, gözenekli yapı veya kafes yapı olarak adlandırılmaktadır [73]. Kafes yapısı, katı monolitik yapılara kıyasla üstün enerji emilimi, ses yalıtımı ve ısı yönetimi yetenekleri nedeniyle mühendislik ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [74]. Havacılık, otomotiv, spor ve biyomedikal endüstrilerinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, araştırmacıları geometrik parametrelerini değiştirerek istedikleri mekanik özellikleri değiştirebilecekleri kafes yapıları kullanmaya yöneltmiştir [75, 76]. Kafes yapılar farklı üretim yöntemleriyle üretilirse de özellikle son yıllarda eklemeli imalat yöntemiyle üretime yönelik araştırmalar hızlanmış ve bunun sonucunda parçaların mekanik, termal, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinde iyileştirmeler test edilmiştir [77]. Eklemeli imalat konusundaki araştırma ve farkındalık son yıllarda arttıkça kafes yapılara olan ilgi de artmıştır. Bunun dört nedeni olduğuna inanılmaktadır [78];

- Üretilcek parçalarda daha az malzeme kullanılır.
- Parça üretimi için harcanan üretim süresini azaltır.
- Parça üretmek için daha az enerji kullanılır.
- İstenilen mukavemet değerini veren optimum ağırlık değeri elde edilebilir.

Kafes yapısının uygulamasına bağlı olarak, parçalar en ideal yapıyı bulmak için tasarım sürecinden geçebilir. Bu yapı, yapısal bütünlüğü korurken önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlar. Bu nedenle, parçanın mukavemetinden ve mekanik özelliklerinden ödün vermeden parçanın ağırlığı azaltılabilir. Günümüzde 3B baskılı kafes yapılar birçok endüstride kullanılmaktadır. Mühendisler ve ürün tasarımcıları her zaman parçaları daha hafif ve daha güçlü hale getirmenin yeni yollarını aradığından, kafes yapısı bu açıdan oldukça elverişlidir. Mekanik avantajlara bakıldığında;

Yüksek mukavemet-ağırlık oranı: Geleneksel üretim yöntemleri daha hafif parçalarla sonuçlanırken, işlem kritik ve kritik olmayan parçaların parçalarının çıkarılmasıyla elde edilir. Ancak kafes yapılar söz konusu olduğunda, karmaşık yapıların geniş alanları küçültülebilmektedir. Kafes yapısıyla ağırlığı azaltmak, yapısal olarak değişmeyen bir ana parçaya kıyasla mukavemeti azaltabilir, ancak mukavemet-ağırlık oranı büyük ölçüde artar. Bu tür uygulamalar, havacılık ve otomotiv endüstrilerinin, parçalarının ağırlığını azaltmak için tasarımlarını yeniden düşünmelerine neden olmuştur. Bunun nedeni, ağırlığın bu alanlarda yakıt tüketimini doğrudan etkilemesidir. Birçok şirket ve üniversitenin araştırma ve geliştirme departmanları, kafes yapılarının geliştirilmesi konusunda araştırmalara devam etmektedir.

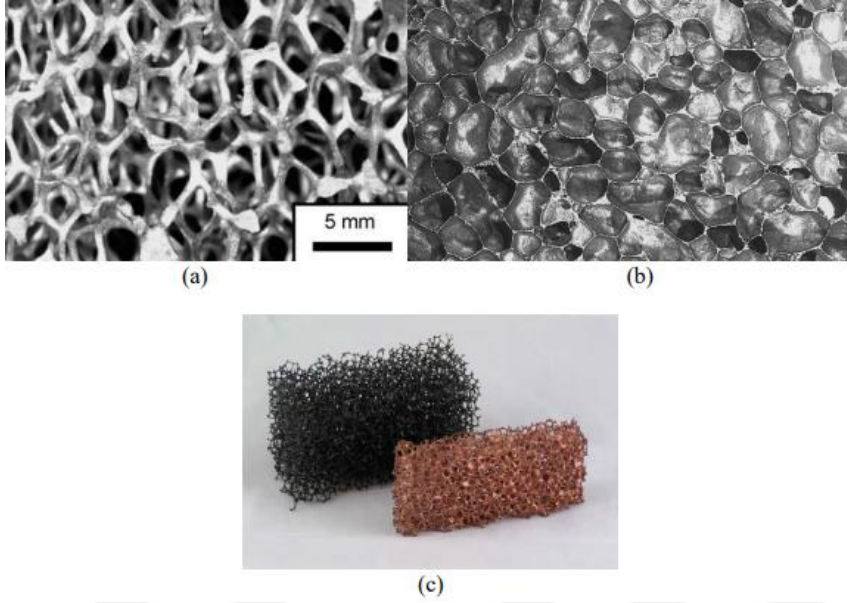
Geniş Yüzey Alanı: Kafes yapısı sadece hafif bir parça oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda parça boyunca geniş bir yüzey alanı oluşturur. Hal böyle olunca da ısı eşanjörleri ve soğutucu düzenekleri gibi ısı transferi uygulamalarının araştırma ve geliştirme aşamasında önemli bir teknoloji haline gelmiştir.

Bilindiği gibi, bir soğutucunun yüzey alanı ne kadar büyükse, ısıyı o kadar iyi dağıtır. Bu nedenle ısıyı dağıtması gereken uygulamalarda daha sağlıklı çalışır. Kafes yapıları, yüzey alanı geleneksel imalat yöntemleriyle daha fazla artırılmadığında kullanılabilir. Bu, soğutma bloğu tasarımını doğrulamamızı ve yüzey alanını artırmak için daha verimli bir uygulama sunulmasını sağlamaktadır.

Yüksek darbe direnci: Kafes yapılarının bir başka mekanik avantajı, parçaların darbeleri emecek ve geçici çarpma gerilmelerini azaltacak şekilde tasarlanabilmesidir. Kafes yapılar, cihazları, parçaları veya herhangi bir yapıyı çarpma ve darbelerden korumak için kullanılır.

2.2.1. Kafes yapı çeşitleri

Hücresel yapılar topolojik olarak iki şekilde inşa edilir. Birim hücrelerin düzenli veya düzensiz tekrarına bağlı olarak, bazen periyodik veya stokastik kafes yapıları olarak adlandırılırlar [78]. Stokastik yapılara sahip hücre elemanları, kullanılan yöntem, parametrelere ve malzeme tipine bağlı olarak tipik olarak açık hücreli veya kapalı hücrelidir. Stokastik kafes yapılara Şekil 2.10'da örnekler verilmiştir. Polimerik hücresel malzemeler uzun süredir titreşim [79], ses [80, 81] ve enerji sönümleme [82, 83] için kullanılmaktadır. Polimer malzemelerin düşük mukavemet değerleri nedeniyle metal köpüklerin kullanımı artmaktadır [84].



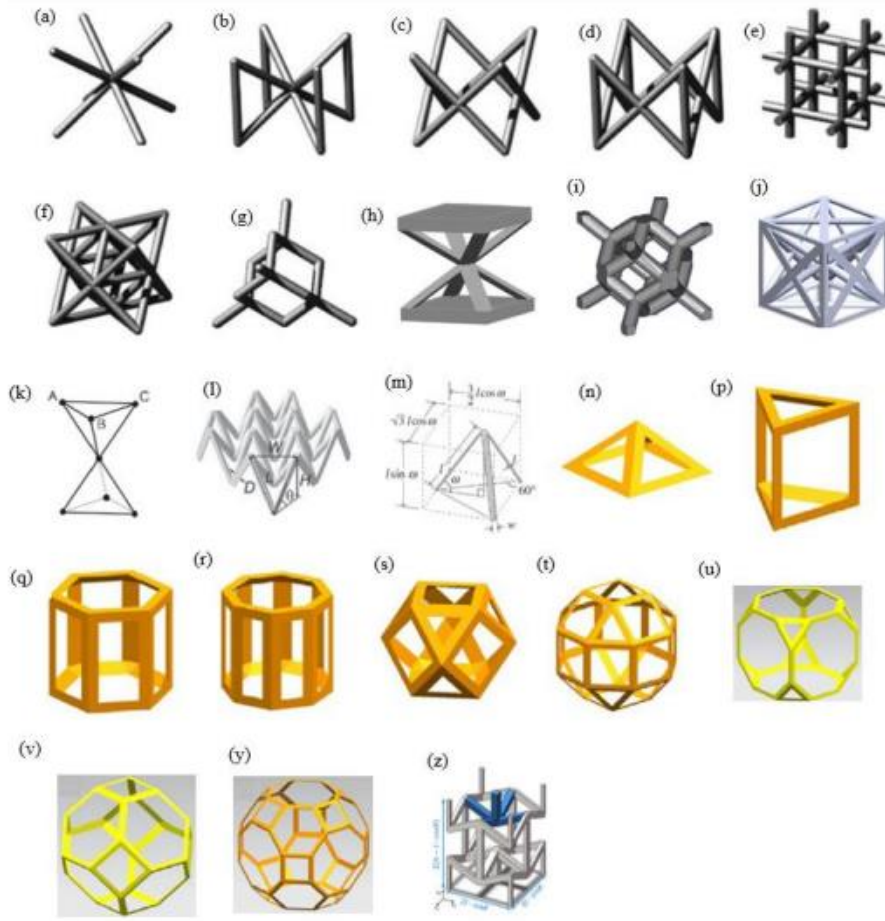
Şekil 2.10. Stokastik hücresel malzemeler, a) açık hücreli alüminyum [78], b) kapalı hücreli alüminyum [85] ve c) açık hücreli stokastik bakır [86].

Stokastik olmayan (düzenli) hücresel malzemeler genellikle kafes yapıları olarak adlandırılır. Kafes yapıları, belirli hücre tiplerinin tekrarlanan rejenerasyonu ile elde edilir. Stokastik hücre materyali gibi rastgelelik yoktur. Gözeneklilik ve konum serbestçe değiştirilebilir, böylece malzemenin mekanik özellikleri değiştirilir [86].

Kafes yapıları şekillerine göre üç farklı kategoride sınıflandırılır;

- Çubuk tabanlı kafes yapıları [7] (Şekil 2.11)
- Üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapıları [7]
- Kabuk kafes yapıları [7]

Şekil 2.11'te görüldüğü gibi, çeşitli çubuk tabanlı kafes yapıları vardır, ancak en yaygın kullanılanları hacim merkezli kübik (BCC) ve yüzey merkezli kübik (FCC) ile dikey çubukların eklenmesiyle oluşturulan hacim merkezli kübik (BCCZ) ve yüzey merkezli kübik (FCCZ). Çeşitli çalışmalarda çoğu diğer yapılardan türetilen yaklaşık 40 farklı kafes yapısının kullanıldığı görülmektedir [78].



Şekil 2.11. Dikme-tabanlı kiriş yapılar; a) BCC [87], b) BCCZ [87], c) FCC [87], d) FCCZ [87], e) Kübik [87], f) Sekizli Kafes Yapı [87], g) Elmas [87], h) G7 [88], (i) Eşkenar Dörtgen Yüzeyli, On iki Yüzlü Şekil [88], (j) BCC-FCC [89], (k) 3 Boyutlu Kagome [78], (l) Piramit [78], (m) Dört Yüzlü Yapı [78], (n) Kare Piramit [35], (p) Üçgen Prizma [92], (q) Altıgen Prizma [90], (r) Sekizgen Prizma [90], (s) Sekiz Yüzlü Küp [90], (t) Eşkenar Dörtgen Yüzeyli, Sekiz Yüzlü Küp [90], (u) Kesilmiş Küp [90], (v) Kesilmiş Sekiz Yüzlü [90], (y) Kesilmiş Sekiz Yüzlü Küp [90], (z) Auxetic Kafes Yapı [91].

Dikme-tabanlı kafes yapılarda Maxwell sayısı (M) çok önemlidir ve Eş. 2.1 yardımıyla bulunur;

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

Bu formülde s çubuk sayısı ve n düğüm sayısıdır. $M < 0$ olduğunda, dış yükleri dengelemek için yeterli çubuk bulunmadığından kolonda eğilme gerilmeleri ortaya çıkar. Bu yapılar eğilme baskın davranış sergilerler.

$M > 0$ olduğunda kolon dış yükleri basma ve çekme yükleri ile karşılayabildiği için mafsallı noktalarında herhangi bir eğim olmaz. Bu yapılar, uzama baskın davranış sergiler (Şekil 2.12) [93].

Kafes yapısına dikey çaprazlar eklendiğinde, malzeme dikey mukavemet ve sertlik arttıkça uzama baskın davranış sergiler [94]. Farklı çubuk tabanlı kafes yapıları için elde edilen Maxwell sayıları Çizelge 2.3 (a)'da gösterilmektedir [95]. Bazı kafes yapıları ve ilgili deformasyon yapıları ise Çizelge 2.3 (b)'de gösterilmiştir.

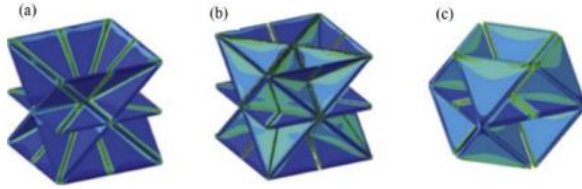
Çizelge 2.3 (a) Farklı kafes yapıları için Maxwell sayıları. (FBCCZ: Ekstra dikmeli hacim yüzey merkezli kübik, F_2B_2CCZ : X, Y ve Z yönlerinde ilave dikmeler olan hacim yüzey merkezli kübik) [95] (b) Bazı kafes yapılar ve deformasyon tipleri [95]

Hücre Tipi	s	n	M	Dikmeler yük uygulama yönünde mi?	Kafes Şekli	Deformasyon Tipi	Şekil
BCC 	8	9	-13	Hayır	Dört yüzlü cisim	Uzama-baskın	
FCCZ 	20	12	-10	Evet	Altı yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
FBCCZ 	28	13	-5	Evet	Oniki yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
F_2B_2CCZ 	44	15	5	Evet	Eşkenar dörtgen yüzeyli, Oniki yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
BCCZ 	12	9	-9	Evet	İkosaedron	Uzama-baskın	
FCC 	16	12	-14	Hayır	Tetrakaidekah edron (14 yüzlü cisim)	Eğilme-baskın	
					Basit köpük model	Eğilme-baskın	
					Sekizli dikme yapı	Uzama-baskın	

(a)

(b)

Kabuk kafes yapısı (Şekil 2.12), birim hücrede çubuklar yerine plakaların bulunduğu bir yapıdır. Bu yapıların elastik özellikleri, aynı yoğunluğa sahip çubuk tabanlı kafes yapılardan daha üstündür, ancak kabuk kafes yapıların, eklemeli imalat ile üretildikten sonra iç kısımlarında kalan tozların temizlenmesi problemlidir. [78].



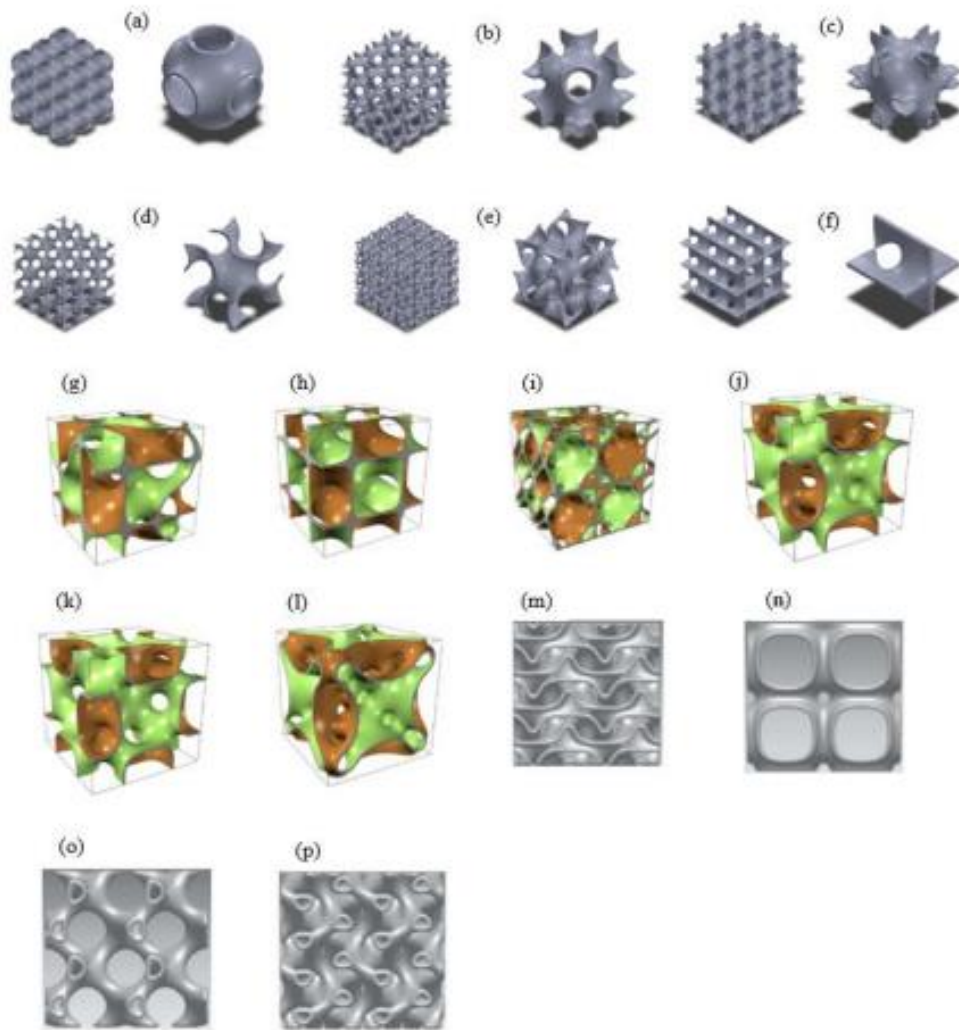
Şekil 2.12 Kabuk kafes yapılar; a) BCC, b) BCC-FCC, c) FCC [78].

ÜPMY (Üçlü Periyodik Minimum Yüzey) kafes yapısı, Çizelge 2.4'te gösterilen formüllerden elde edilen eğri yüzeyler kullanılarak oluşturulan eğri bir labirent kafes yapısıdır. Bu yapıların eğik düzlemleri, eklemeli imalat sırasında bir önceki katmanın bir sonraki katmanı desteklemesine izin verir ve genellikle ek destekler olmadan üretilebilir [78].

Çizelge 2.4. Üçlü periyodik minimum yüzey formülleri [78, 96].

Şekil	Yüzey formülü
Schoen gyroid	$U = \cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) - t$
Schwarz elmas	$U = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) + \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) - t$
Schwarz primitif	$U = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$
Neovius	$U = 3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4 \cos(x) \cos(y) \cos(z)$
D-prime	$U = 0.5(\sin(x) \sin(y) \sin(z) + \cos(x) \cos(y) \cos(z)) - 0.5(\cos(2x) \cos(2y) + \cos(2y) \cos(2z) + \cos(2z) \cos(2x)) - t$
$k_i = 2\pi n_i / L_i$ k_i : x, y ve z yönündeki k değeri n_i : x, y ve z yönündeki, birim hücre tekrar sayısı L_i : x, y ve z yönündeki yapının boyutu	

ÜPMY'nin enerji absorpsiyon özellikleri literatürde incelenmiş ve şu anda uzay araçlarında kullanılan petek yapıların yerine kullanılabileceği yorumlanmıştır [97]. Elmas ve gyroid yapıları ÜPMY kafes yapılar (Şekil 2.13) arasında eğilme baskın davranış sergilerken, ilkel yapılar gerinim baskın davranış sergiler. İlkel yapının Young modülü ve basma dayanımı, elmas ve gyroidlerden daha yüksektir. Bu nedenle, yüksek dayanım gerektiren yapılar için yük yönünde ilkel kafes yapıları, deformasyon öncesi parçaların yüksek uzama göstermesi gereken yapılar için elmas veya gyroid kafes yapıları önerilir [98].



Şekil 2.13. ÜPMY kafes yapılar; (a) Primitif [99], (b) IWP [32], (c) Neovius [99], (d) Gyroid [99], (e) Fischer-Koch S [99], (f) CLP [99], (g) C(Y) [100], (h) Elmas [100], (i) C(D) [100], (j) Batwing [100], (k) F-RD [100], (l) Manta 35 [100], (m) L-tipi [78], (n) Boru şeklinde P- tipi [78], (o) Boru şeklinde G- tipi [78], (p) I2-Y-tipi [78]

2.2.2. Kafes yapıların tasarımındaki önemli parametreler

Kafes yapıları tasarlarken dikkat edilmesi gereken ve bilinmesi önemli 4 farklı özellik mevcuttur;

Hücre Oryantasyonu: Hücrelerin oluşturulduğu açı ve yön, 3B baskı sırasında hücreleri oluşturmak için gereken destek malzemesinin miktarını ve konumunu değiştirebilir. Bu faktörün baskı başarısı üzerinde doğrudan etkisi vardır. Ancak kafes yapımının en önemli özelliklerinden biri kendi kendini taşıyacak şekilde tasarlanabilmesidir. Kafes yapılarındaki desteklere olan ihtiyaç, üretim sırasında baskıların hedeflenen hizalanmasıyla azaltılabilir veya tamamen ortadan kaldırılabilir. Çoklu jet füzyon (MJF) ve seçici lazer sinterleme gibi toz 3B baskı teknolojileri, kafes yapısı tasarımına veya üretim yönelimine bakılmaksızın destek malzemelerinin kullanılmasını gerektirmez, çünkü imalat sırasında destek malzemesi tozun kendisidir. Ancak diğer birçok eklemeli imalat teknolojisi kendi kendini desteklemeyen yapısal destekler kullandığından, hücre açısı ve yönelimi hem tasarımda hem de imalatla dikkate alınması gereken parametreler arasındadır.

Hücre Boyutu ve Yoğunluğu: Hücre boyutu ve yoğunluğu, ızgaradaki hücrelerin boyutunu ve bu hücrelerin ne sıklıkta tekrarlandığını tanımlar. Hücre boyutu, yalnızca onu oluşturan yapısal elemanların kalınlığına ve uzunluğuna değil, aynı zamanda bağlantı düğümlerine de bağlıdır. Tekrarlama yoğunluğunu artırmak kolaydır. Bu, bir birim alanda aynı şeklin birçok tekrarı olduğu anlamına gelir. Daha büyük hücrelerin üretimi daha kolaydır, bu da daha sert (daha az esnek) bir yapı ile sonuçlanır. Küçük hücreler ise daha homojen bir sistem sergilerler ve daha esnek yapılar oluşturabilirler.

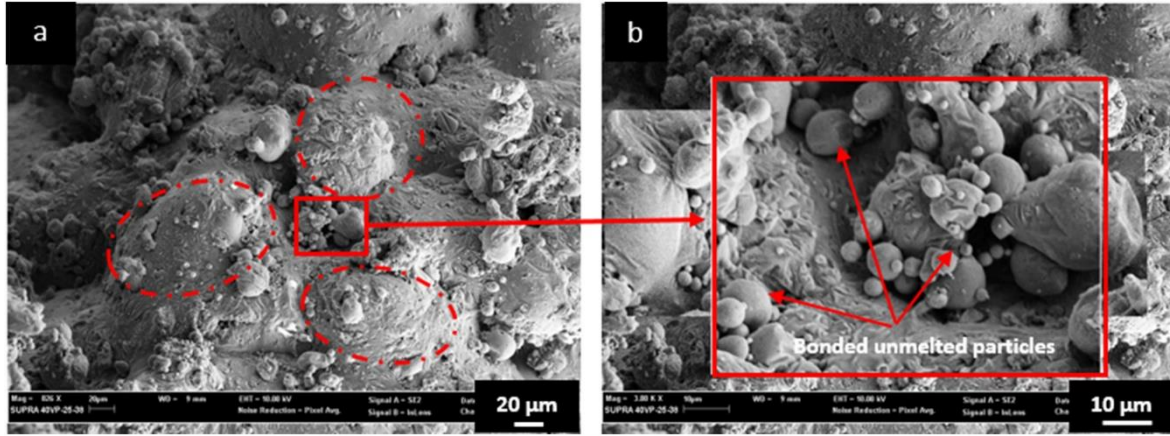
Malzeme Seçimi: Malzeme seçimi, 3B baskılı parçalar için olduğu kadar kafes yapılar için yoğunluk, sertlik, ağırlık ve boyut gibi kafes yapı özelliklerini tanımladığından çok önemlidir. Aynı zamanda, tüm malzemeler kafes yapıları için uygun değildir. Esnek ve yumuşak malzemeler, büyük gözenekli bölümlerde bileşenlerin bükülmesine neden olabileceğinden, yapım ve üretim sırasında büyük hücre yapıları ile basılmamalıdır.

Hücre Oryantasyonu: Hücrelerin oluşturulduğu açı ve yön, 3B baskı sırasında hücreleri oluşturmak için gereken destek malzemesinin miktarını ve konumunu değiştirebilir. Bu faktörün baskı başarısı üzerinde doğrudan etkisi vardır. Ancak kafes yapımının en önemli özelliklerinden biri kendi kendini taşıyacak şekilde tasarlanabilmesidir. Kafes yapılarındaki desteklere olan ihtiyaç, üretim sırasında baskıların hedeflenen hizalanmasıyla azaltılabilir veya tamamen ortadan kaldırılabilir. Multi jet füzyon ve seçici lazer sinterleme gibi toz 3B baskı teknolojileri, kafes yapısı tasarımına veya üretim yönelimine bakılmaksızın destek malzemelerinin kullanılmasını gerektirmez, çünkü imalat sırasında destek malzemesi tozun kendisidir. Ancak diğer birçok eklemeli imalat teknolojisi kendi kendini desteklemeyen yapısal destekler kullandığından, hücre açısı ve yönelimi hem tasarımda hem de imalatla dikkate alınması gereken parametreler arasındadır.

2.3. SLM ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri

SLM işleminin çalışma prensibi, diğer eklemeli imalat prosesleri gibi, bilgisayar ortamında oluşturulan katı modellerin katman katman üretilmesine dayanmaktadır. SLM sürecinin şematik bir diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Birçok çalışma mekanik özelliklerin üretimden sonra parçalara ısıtıl işlem uygulanarak iyileştirilebileceğini göstermektedir [101-103].

SLM ile üretilen kafes yapısının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 2.14'de gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi bir parçanın mekanik özelliklerini etkileyen birçok faktör vardır; kafes yapısı boşlukları, eritilmemiş tozlar ve SLM ile üretilmesinden kaynaklı geometrik kusurlar gibi. Üretim açısı, lazer gücü, lazere maruz kalma süresi ve tarama hızı gibi çeşitli üretim parametreleri de mikro örgü yapılarının mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 2.14. (a) Kafes yapı çubuk yüzeyi SEM görüntüleri (b) Kafes yapı yüzeyinin yüksek büyütme SEM görüntüleri [104]

2.4. Deneysel Çalışmalar

Kafes yapılar, yüksek mukavemet-ağırlık oranları ve termal iletkenlikleri nedeniyle havacılıkta tercih edilmektedir [78]. Örneğin, literatürde, kanadın hücum kenarına entegre edilmiş buzlanma önleyici sistemlere sahip kafes yapılarının kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır. Kuş çarpmaları öncelikli olarak kanadın hücum kenarında görüldüğünden [105, 106], bu bölgede kullanılan kafes yapısı sayesinde olası bir kuş çarpması sırasında emilen daha fazla enerji nedeniyle daha az hasar beklenir [107]. Uzay aracındaki elektrikli ekipmanların sıcaklığını belirli bir seviyede tutmak için kullanılan faz değiştirici ısıtıcı kontrolörü AlSi10Mg toz malzemeden SLM ile üretilmiştir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, SKM metoduyla yapılan üretimle %60 daha hafif ağırlık ve %50 ısı kapasitesi artışı sağlanmıştır [108].

SLM, metal mikro yapıların üretilmesi için en önemli üretim süreçlerinden biri olma potansiyeline sahip bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır [106, 107]. Bu tekniği kullanarak, Ushijima ve diğerleri [110] ve Gümrük ve diğerleri [108, 109] hacim merkezli kübik (BCC) yapıya sahip paslanmaz çelik mikro kafes bloklar üretmişlerdir. Basma ve diğer yükleme koşulları altında imal edilen yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmalarda özgül elastik modülü ve ilk çökme mukavemeti gibi değerlere ek olarak hücreler çöktüğünde mikro tellerde meydana gelen deformasyon mekanizmalarını da araştırmışlardır. Yapılan gözlemler sonucunda; BCC mikro kafesinin çökme davranışının, mikro tellerin kesişme noktalarının yakınında meydana gelen plastik deformasyon ve buna

bağlı olarak kesişmeler etrafında oluşan eğilme deformasyonu tarafından yönlendirildiği tespit edilmiştir. Mikro kafeslerin modül ve mukavemet değerlerinin iyileştirilmesine yönelik farklı malzemelerden farklı kafes yapı topolojilerinin kullanılması gibi çalışmalar son yıllarda oldukça popülerdir.

FCC ve BCC birim hücre kafeslerine dörder dikey çubuk eklenmesi (böylelikle FCCZ ve BCCZ elde edilir), bu dikey çubukların hücre yapısının deformasyon davranışını etkilediğini ve sonuç olarak, özgül mukavemeti ve elastik modülün büyük ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. [111, 112]. Ek dikey destekler kullanmak veya bu elemanların çapını artırmak, bu kafes yapılarının ağırlığını önemli ölçüde artırmadan mekanik mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde artırmak için önemli seçeneklerdir.

Lei ve diğerlerinin [113] yaptığı çalışma sonucunda birim hücre konfigürasyonundaki farklılık nedeniyle, aynı sayıda katmana sahip BCC ve BCCZ panellerin mekanik performansının önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür. Verilen sonuç grafiğinden BCCZ hücresinin, üstün yük taşıma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Gümrük ve diğerlerinin [114] BCC kafes yapısına, BCC kafes yapısına eklenen dikey çubuklarla oluşturulan BCCZ yapısına ve F_2 BCC yapısına basma testi uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda özgül elastisite ve basma dayanımı açısından üç kafes yapı arasında en iyi mekanik davranışın BCCZ kafes yapısına ait olduğu belirlenmiştir.

Mcknown ve diğerleri [115] ve Smith ve diğerleri [116] benzer bir çalışmada BCC ve BCCZ kafes yapılarının statik ve patlama yükleri altındaki davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Basma yüklemesi altındaki çökme ve statik çökme mekanizmalarının benzer olduğunu ve kafes yapılarının akma dayanımına göre bir dereceye kadar gerinim hızı bağımlılığı sergilediğini bulmuşlardır.

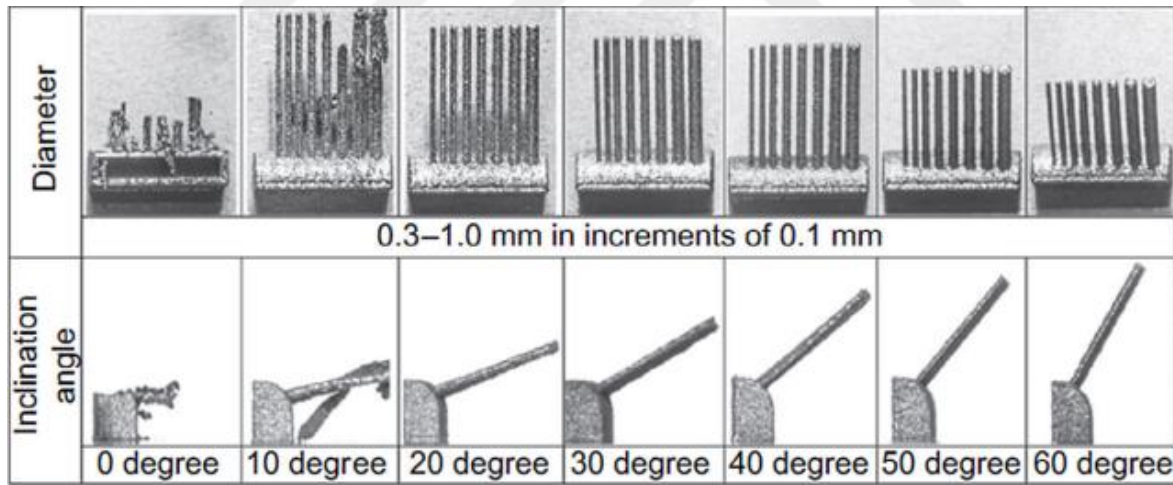
Shen ve diğerkleri, BCC ve BCCZ mikro örgü yapıları ve bunların türetilmiş sandviç yapıları üzerinde basma testleri gerçekleştirmiştir. Bu yapıların mekanik özellikler açısından yüksek düzeyde tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu bulmuşlardır [117].

SLM eklemeli üretim tekniğı, kafeslerin iç morfolojisi üzerinde kontrol sağlayarak karmaşık geometrilerin üretilmesini sağlar [118]. SLM kafes yapıları için en yaygın çubuk tabanlı hücre topolojileri, hacim merkezli kübik (BCC) ve dikey çubuk yapılarına sahip hacim merkezli kübik (BCCZ) içerir [119, 120]. Rashed ve diğerkleri [121] kafes yapılarının iyi bir enerji emme performansına sahip olduğunu ve yolcuları darbeden korumak için otomobil tasarımında kullanılabileceğini bulmuştur. Son zamanlarda, dinamik yükleme altında çok katmanlı kafes yapıların deformasyon ve enerji soğurma özellikleri çok dikkat çekmiştir. BCC kafes yapısı durumunda, Gümrük [122] paslanmaz çelik kafes yapısının basınç davranışını incelemiş ve çevreleyen çubuklar kademeli olarak ezildiğinde BCC kafes yapısının merkezinde lokal deformasyon meydana geldiğini bulmuştur. Ek olarak, BCC numunelerinin çubuktaki baskın eğilme davranışı nedeniyle daha düşük yük taşıma kapasitesi vardır. Lei ve diğerkleri [123], bir BCCZ yapısına bağlı dört dikey çubuklu BCC yapı örnekleri tasarlamış, bunların basma davranışlarını karşılaştırmış ve dikey çubukların eklenmesinin basma dayanımını arttırdığını bulmuştur. BCCZ numunesinin özgül ağırlığı biraz artmasına rağmen, elastisite modülü ve basma dayanımı, BCC numunesine kıyasla sırasıyla 1,7 ve 2,5 kat artmıştır. Ek dikey desteklerin kullanılması, bu kafes yapılarının ağırlıklarını önemli ölçüde artırmadan mekanik mukavemetini ve sertliğini önemli ölçüde artırmak için harika bir seçenek olmuştur.

SLM işlemi, yoğun bir kafes tasarımı elde etmek amacıyla metal tozlarını birleştirmek için bir lazer ışını kullanır. Tasarımın üretilebilirliği, büyük ölçüde aşağıdaki kontrol parametrelerinin doğru kombinasyonuna bağlıdır;

- Lazer nokta çapı,
- Lazer gücü,
- Lazer tarama hızı,
- Katman kalınlığı ve
- Toz parçacık boyutu.

Örneğin, küçük lazer nokta çapı ve ince tane boyutunun bir kombinasyonu, çok ince dikmelerin eklemeli üretimine olanak tanır [124], bu da bunların çıkarılmasını kolaylaştırır, ancak ince dikmeler çok hassastır ve zarar görebilir [125]. Bir başka inşaa sınırlaması, sarkan yapılardır. Kafes dikmeleri katman katman oluşturulduğundan, iki bitişik katman arasında iyi bir temas sağlanmalıdır. Bunun yapılmaması, üretilemez veya üretilmesi tehlikeye atılmış geometri ile sonuçlanacaktır. Sarkan yapılar, amaçlanan şekli elde etmek için genellikle fazladan destek yapılarına ihtiyaç duyar. Küçük kafes yapılar için destek yapılarının çıkarılması yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilir. Kaldırma işlemi genellikle çok çarpık geometriye neden olur. Bu nedenle, kafes yapısı kendinden destekli olmalıdır. Optimize edilmiş bir dizi proses parametresiyle ulaşılabilirliği belirleyen SLM üretim spesifikasyonunun minimum boyutu, kullanılan SLM makinesi/malzeme kombinasyonuna bağlıdır. Mazur ve diğerleri [126] Şekil 2.15'de gösterildiği gibi, optimize edilmiş SLM üretim parametreleriyle 0,3 mm çaplı ve yatayla 20°'lik bir açıya sahip Ti6Al4V konsol dikmelerini başarılı bir şekilde üretebilmişlerdir.

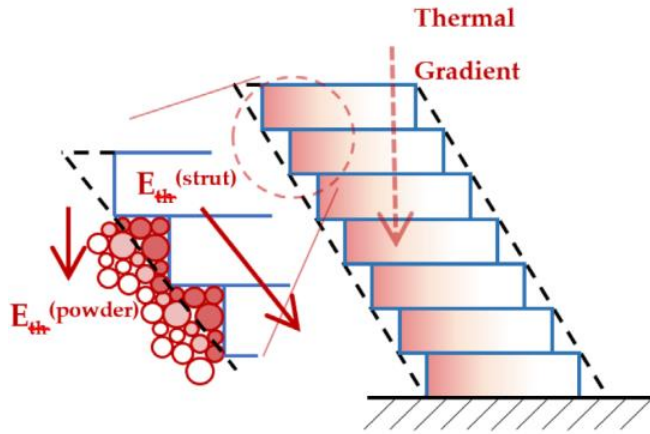


Şekil 2.15. Farklı çaplarda ve eğim açılarında üretilen konsol dikmeler [126]

Leary ve diğerleri [127] ise 0,2 mm çapa ve 10° dikme açısına sahip dar SLM Inconel 625 dikme numunelerinin düşük gözeneklilik ile basılabileceğini göstermiştir. Liu [128] istatistiksel analiz bir analiz yaparak, geometrik kusurların en çok olarak yatay çubuklarda olduğunu göstermiştir. Dikey çubuklar geometrik kusurlara en az eğilimlidir. Arabnejad ve diğerleri [129] ise tanelerin aşırı erimesinin, sarkan yatay desteklerin kalınlık değişimini önemli ölçüde arttırdığını bulmuştur. Bunun yanı sıra Gorguluarslan ve Gungor [130] her katmandaki çubuk elemanlarının çaplarının bulunduğu uzamsal konuma bağımlı olduğunu

göstermiştir ve bu durum da göz ardı edilmemelidir. Santorinaios ve diğerleri [131] lokalize kusurları olan çubukların silindirik olmadığını göstermek için gölge grafikleri kullanmış ve çubukların kesitinin dairesel değil oval olduğunu ispatlamıştır.

SLM kafes yapılarının yüzey kalitesi pürüzsüz değildir. Büyük çubukların üzerinde genellikle, yüzey kalitesini etkileyen büyük miktarda kısmen erimiş metal tozu bulunur. Yüzey kaplaması, sütunların eğim açısına çok duyarlıdır. Merdiven etkisi, yukarı ve aşağı bakan yüzeylerin kalitesini açıkça ayırt eder. Termal enerji, sıcaklık gradyanı yönünde doğrudan eriyik katmanları arasında akar. Eğimli çubuklar, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi farklı termal gradyanlara ve çubuk yönelimlerine sahiptir, bu da dikey çubuklara kıyasla daha yavaş ısı transferine neden olur [132]. Sonuç olarak, çıkıntılı yapının alt tarafı sıklıkla görülür ve termal enerji birikimi malzeme yapısını değiştirir [133].



Şekil 2.16. SLM eklemeli imalat sırasında ısı transferinin şeması [132]

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm kafes yapıların tasarımı, kafes yapıların SLM ile üretimi, mekanik testler ve mikro yapısal karakterizasyon başlıkları altında açıklanacaktır.

3.1. Kafes Yapıların Tasarımı

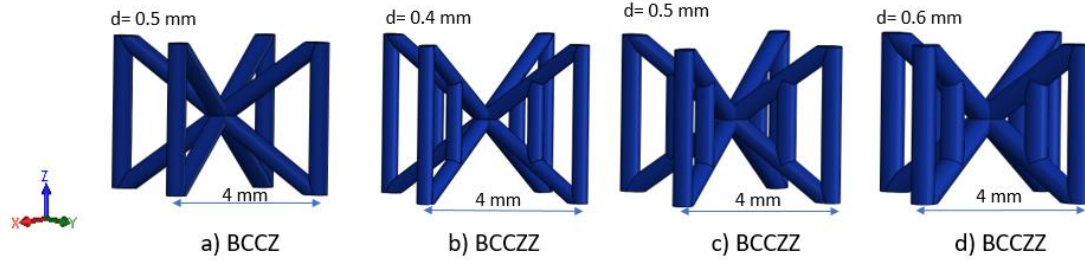
Dikey çubuk destekli hacim merkezli kübik (BCCZ) ve dikey çubuk destekli yüzey merkezli kübik (FCCZ) ve özgül tasarım olan ekstra dikey çubuk destekli BCCZZ ve FCCZZ kafes yapıları üç boyutlu modelleri Solidworks yazılımında geliştirilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de verildiği gibi BCCZ, BCCZZ, FCCZ ve FCCZZ kafes yapılarının birim hücresi için $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$ boyutları seçilmiştir. Birim hücreler bir kartezyenin x, y ve z eksenleri boyunca periyodik olarak tekrarlanmış ve her yöndeki hücre sayısı $n_x = n_y = n_z = 5$ şeklinde tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

AlSi10Mg alaşımının malzeme yoğunluğu (ρ_s) $2,67 \text{ g/cm}^3$ tür (ERMAK A461-AlSi10Mg). Bağıl yoğunluğun (ρ^* / ρ_s), kafes malzemesinin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkisi vardır [134] ve Çizelge 4.2’ de kafes yapıların hesaplanan bağıl yoğunlukları verilmiştir. Bağıl yoğunlukları aşağıda verilen Eş. 3.1 ile hesaplanmıştır.

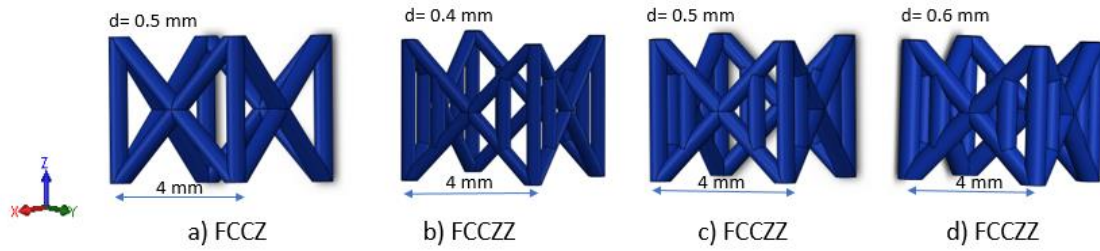
$$\bar{\rho} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.1)$$

Burada (ρ^*) görünür yoğunluğu, (ρ_s) ise ana malzemenin yoğunluğunu temsil etmektedir. Üretilen numunelerin analitik hassas terazi ile tartılıp, kumpas ile en, kalınlık ve yükseklik ölçüleri alınmıştır. Elde edilen bu değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Numunelerin çizelgede verilen ölçüleri ile hacmi hesaplanıp, numune ağırlığına bölünerek görünür yoğunlukları (ρ^*) hesaplanmıştır. Hesaplanan görünür yoğunlukları (ρ^*) malzeme yoğunluğuna (ρ_s) oranı ile de bağıl yoğunlukları (ρ^* / ρ_s) hesaplanmıştır. Bağıl yoğunluğun mekanik özellikler üzerinde etkisi dikkate alınmış ve mekanik özellikleri karşılaştırmak için BCCZ ve FCCZ çubuk çapı 0,5 mm, BCCZZ ve FCCZZ için ise çubuk çapları 0,4, 0,5 ve 0,6 olarak tasarlanmıştır. Burada amaç aynı zamanda çubuk çapının da özgül dayanım

üzerine etkisini incelemektedir. Numuneler isimlendirilirken “Kafes yapı tipi-çubuk çapı” kısaltması kullanılmıştır (Örnek: FCCZZ-0,6).



Şekil 3.1. Kafes yapılarının birim hücresi ve boyutları (a) BCCZ-0,5 (b) BCCZZ-0,4 (c) BCCZZ-0,5 (d) BCCZZ-0,6



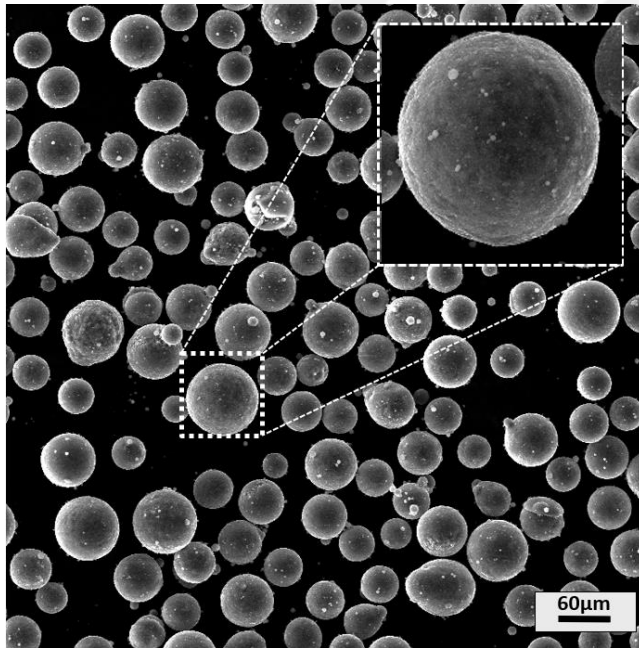
Şekil 3.2. Kafes yapılarının birim hücresi ve boyutları (a) FCCZ-0,5 (b) FCCZZ-0,4 (c) FCCZZ-0,5 (d) FCCZZ-0,6

3.2. Kafes Yapıların SLM ile Üretimi

Bu çalışmada, Çizelge 3.1’de kimyasal kompozisyonu verilen, ticari olarak temin edilebilen ASTM F3318 – 18 tozları (ERMAK A461-AlSi10Mg; ERMAKSAN) kullanılmıştır. Malvern Mastersizer 3000 cihazında yapılan analizler sonucunda d10: 23,4 μm , d50: 33,0 μm , d90: 46,3 μm olarak bulunmuştur. Kullanılan AlSi10Mg metal tozu parçacıklarının SEM görüntüsü Şekil 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Toz kimyasal kompozisyonu (% Ağırlıkça)

Element	Sonuç
Alüminyum	Kalan değer
Bakır	0,04
Demir	0,25
Magnezyum	0,42
Mangan	0,36
Azot	0,12
Nikel	0,03
Oksijen	0,11
Kurşun	0,02
Silisyum	9,61
Titanyum	0,09
Çinko	0,04
Diğerleri	0,05
Diğer tüm değerleri	0,15

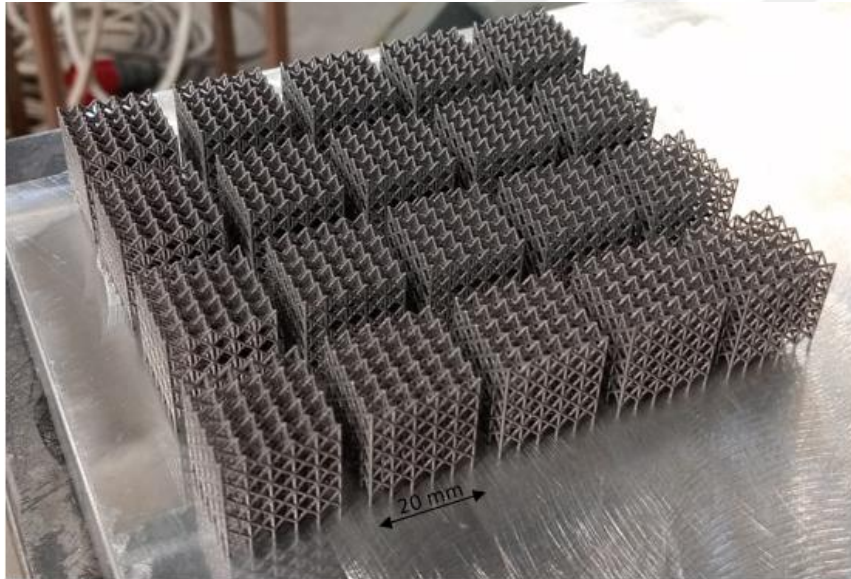


Şekil 3.3. Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg metal tozu parçacıklarının SEM görüntüsü

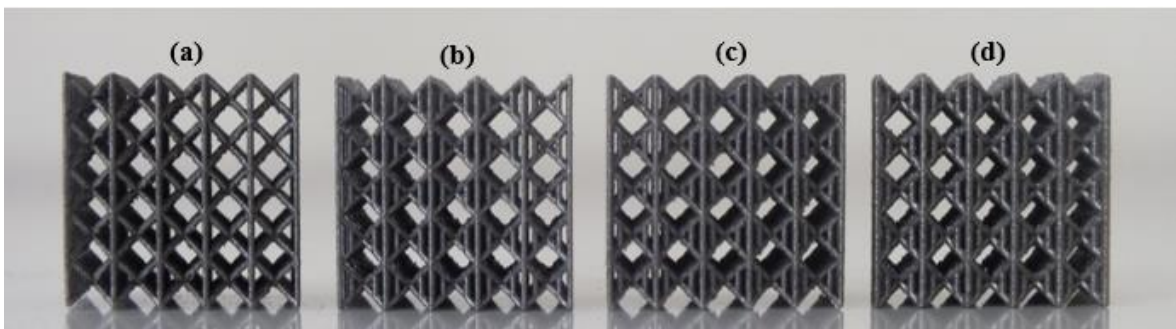
Şekil 3.5'te verilen kafes numuneleri argon gazı altında Şekil 3.4'te gösterilen ERMAKSAN EnaVision 250 SLM cihazı kullanılarak üretilmiştir. Genel üretim parametreleri; 320 W lazer gücü, 0,1 mm tarama aralığı, 800 mm/sn tarama hızı, 85 μm lazer nokta çapı ve 30 μm katman kalınlığı olarak seçilmiştir. SLM tarafından üretilen BCCZ, BCCZZ, FCCZ ve FCZZZ örneklerinin görüntüleri sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de sunulmaktadır.



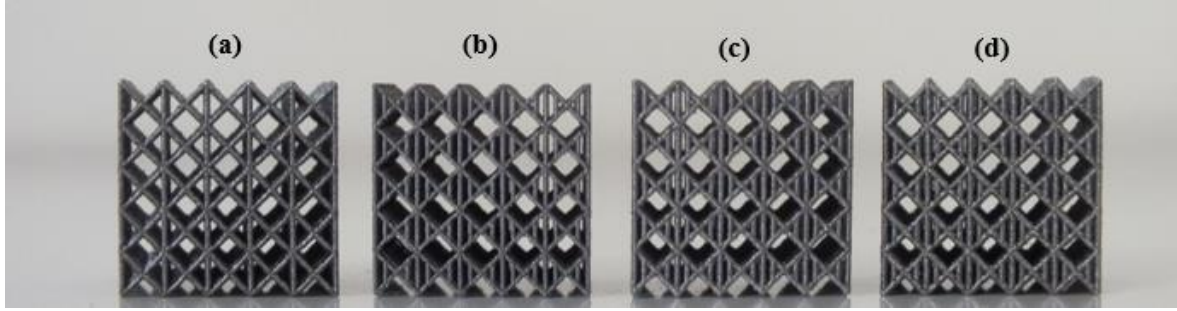
Şekil 3.4. ERMAKSAN EnaVision 250 SLM cihazı



Şekil 3.5. SLM yöntemi ile üretilen kafes yapıların bir seti



Şekil 3.6. SLM ile üretilen kafes yapı numuneleri (a) BCCZ-0,5 (b) BCCZZ-0,4 (c) BCCZZ-0,5 (d) BCCZZ-0,5



Şekil 3.7. SLM ile üretilen kafes yapı numuneleri (a) FCCZ-0,5 (b) FCCZZ-0,4 (c) FCCZZ-0,5 (d) FCCZZ-0,5

Üretilen kafes numuneleri Şekil 3.8’ de verilen AXIS AGN220C Analitik Hassas Terazi ile tartılmış, numune boyutları ise kumpas ile ölçülmüştür.

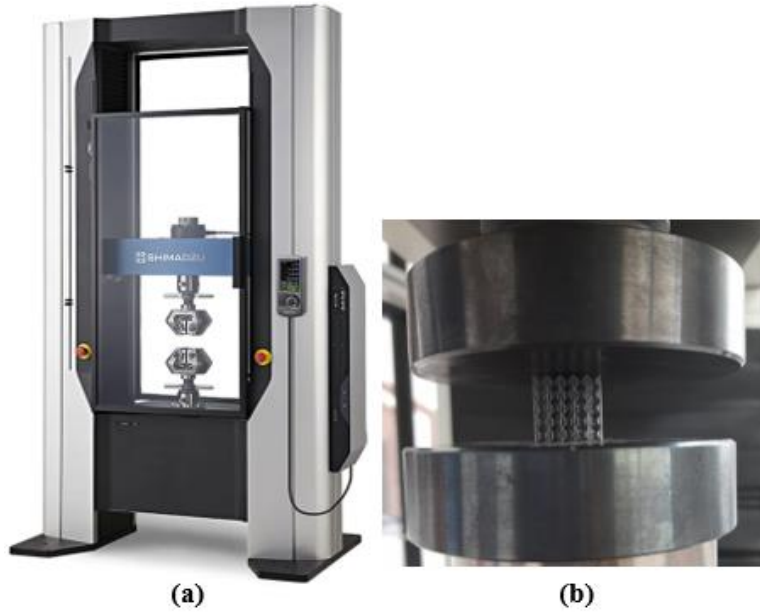


Şekil 3.8. AXIS AGN220C Analitik Hassas Terazi

3.3. Mekanik Testler ve Mikroyapısal Karakterizasyon

Kafes yapıları, Şekil 3.9 (a)’da görülen Shimadzu Autograph AGIS-100 kN universal mekanik test cihazı Şekil 3.9 (b)’de gösterildiği gibi kullanılarak, gerinim hızı olarak (10^{-3} s^{-1}) olacak şekilde ayarlanarak basma testine maruz bırakılmış ve 0,5 gerinim değerine kadar her bir kafes yapı için basma testi en az üç kez tekrarlanmıştır. Ayrıca testin ilk bölümünde oluşan şekil değişikliğini daha iyi analiz edebilmek için her bir kafes yapısından birer numune 0,15 gerinim değerine kadar test edilmiştir. Yer değiştirme, basma kafalarının yer değiştirmesi esas alınarak ölçülmüştür. Nominal gerilmeler, yük

hücresiyle ölçülen kuvvetin numunenin genel kesit alanına bölünmesiyle elde edilirken, birim şekil değiştirme değeri, numunedeki eksenel yer değiştirme miktarının numune yüksekliğine bölünmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 3.9. (a) Shimadzu Autograph AGIS-100 kN üniversal mekanik test cihazı, (b) Uygulanan basma testine örnek

Kafes yapısı örneklerinin partikül büyüklüğü ve şekli, yüzey morfolojisi, AlSi10Mg numunelerinin mikro yapısı ve deforme olmuş örneklerin deformasyon mekanizması gibi özelliklerin görüntülenmesinde Şekil 3.10'da verilen TESCAN MIRA3 XMU taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.10. TESCAN MIRA3 XMU markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, seçici lazer ergitme (SLM) ile AlSi10Mg kullanılarak üretilen, dikey çubuk destekli yüzey merkezli kübik (FCCZ) ve dikey çubuk destekli hacim merkezli kübik (BCCZ) ve bu yapılara eklenen dikey çubuklar ile özgül yapılar olan FCCZZ ve BCCZZ kafes numunelerinin üretim sonrası fiziksel özelliklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca üretimi gerçekleştirilen tüm kafes numunelerine basma testleri yapılmış ve deneysel testlerin sonuçları verilmiş ve yorumlamaları gerçekleştirilmiştir.

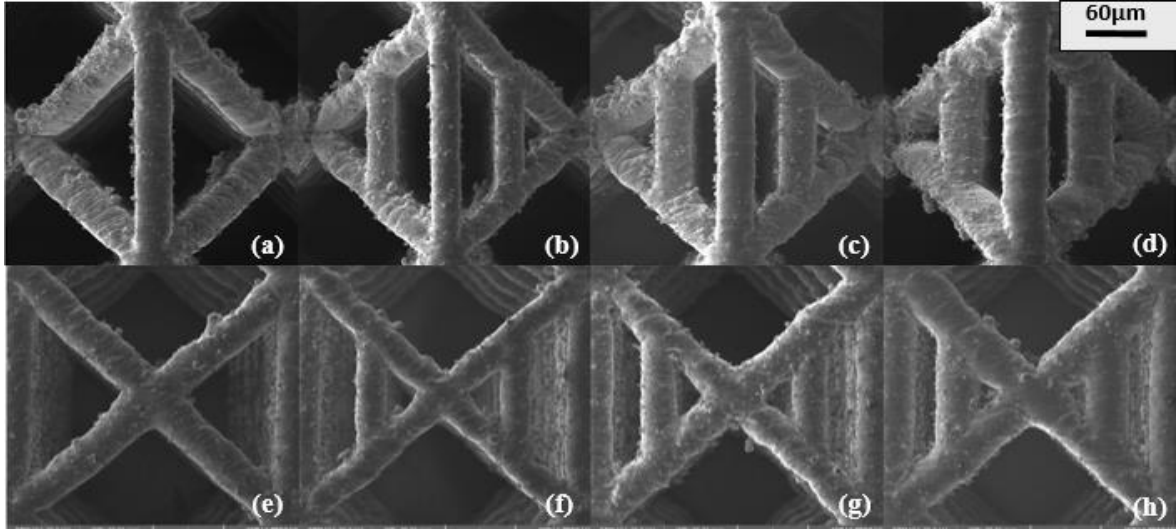
Her bir kafes yapıdan üçer numunenin hassas terazi ile ölçümünden elde edilen kütle değerleri ve kumpas ile ölçülen en, kalınlık ve yükseklik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Üretilen kafes numunelerin en, kalınlık, yükseklik ve kütle ölçüm sonuçları

Numune Adı	Numune Ölçüleri (mm)			Numune Kütlesi (g)
	Kalınlık	En	Yükseklik	
BCCZ-0,5-1	20,47	20,55	20,32	2,4341
BCCZ-0,5-2	20,56	20,55	20,35	2,4372
BCCZ-0,5-3	20,54	20,55	20,40	2,4470
BCCZZ-0,4-1	20,40	20,55	20,31	2,0300
BCCZZ-0,4-2	20,45	20,35	20,24	2,0350
BCCZZ-0,4-3	20,48	20,36	20,36	2,0454
BCCZZ-0,5-1	20,60	20,55	20,40	2,8339
BCCZZ-0,5-2	20,56	20,51	20,45	2,5604
BCCZZ-0,5-3	20,60	20,55	20,54	2,8832
BCCZZ-0,6-1	20,65	20,70	20,53	2,8625
BCCZZ-0,6-2	20,63	20,75	20,56	3,7055
BCCZZ-0,6-3	20,65	20,75	20,55	3,7284
FCCZ-0,5-1	20,60	20,65	20,20	2,2192
FCCZ-0,5-2	20,57	20,68	20,27	2,2303
FCCZ-0,5-3	20,58	20,60	20,34	2,2346
FCCZZ-0,4-1	20,55	20,55	20,20	1,8615
FCCZZ-0,4-2	20,45	20,50	20,25	1,8720
FCCZZ-0,4-3	20,47	20,49	20,22	1,8768
FCCZZ-0,5-1	20,65	20,68	20,25	2,6939
FCCZZ-0,5-2	20,55	20,62	20,28	2,7107
FCCZZ-0,5-3	20,6	20,58	20,25	2,7160
FCCZZ-0,6-1	20,75	20,80	20,25	3,5644
FCCZZ-0,6-2	20,70	20,75	20,37	3,5813
FCCZZ-0,6-3	20,68	20,80	20,38	3,5860

4.1. Mikroyapısal Karakterizasyonu Sonuçları (Numunelerin Üretim Sonrası SEM Görüntüleri)

Şekil 4.1’de sırasıyla, sırasıyla BCCZ-BCCZZ ve FCCZ-FCCZZ örnek basma numune numunelerinin çubuklarının önden görünümüne odaklanılmış SEM görüntüleri gösterilmektedir. Yüzeylerde yapısal bütünlüğün korunduğu görülmektedir. BCCZZ ve FCCZZ yapılarının iç çubukları dış çubuklarla birleştirilmeden başarıyla üretildiği açıkça görülmektedir.

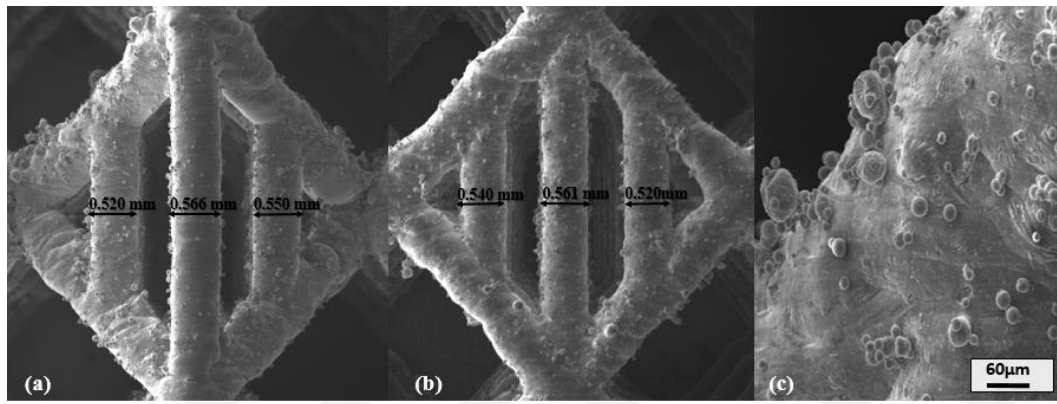


Şekil 4.1. SLM tarafından üretilen numunelerin yüzey morfolojisi (a) BCCZ-0,5 (b) BCCZZ-0,4 (c) BCCZZ-0,5 (d) BCCZZ-0,5 (e) FCCZ-0,5 (f) FCCZZ-0,4 (g) FCCZZ-0,5 (h) FCCZZ-0,5

Üretilen kafes yapıların çubuk çaplarının tasarım çapları arasındaki farkı gözlemlemek için üretilen numunelerin seçilen bölgelerinden çubuk çapları ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2 (a ve b)'de örnek BCCZZ-0,5 ve FCCZZ-0,5 numunelerinde gerçekleştirilen kafes yapı dikey çubuk çaplarının bölgesel ölçümlerinden temsili bir görüntü verilmiştir. Teorik olarak 0,5 mm çubuk çapı ile tasarlanan BCCZZ-FCCZZ yapılarının deneysel olarak çap değişimleri Şekil 4.2 (a ve b)'de görülmektedir.

Üretilen tüm kafes yapıların on kez dış çubuk çapından ve beşer kez iç çubuk çaplarından ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu verilerden anlaşılabileceği üzere tasarlanan geometrilerin çubuk çaplarından daha büyük çaplarda geometriler üretilmiştir. SLM ile üretim yapılırken Şekil 4.2 (c)'de görüldüğü gibi tam olarak ergimeyen veya kısmen ergiyen toz parçacıkları ortaya çıkmaktadır ve bu durum üretilen çubuk çaplarının tasarlanandan daha büyük olmasına katkıda bulunmaktadır. 0,4 mm çap miktarının değişimi Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi genel olarak 0,6 mm çap miktarından daha azdır. Ayrıca diyagonal çubukların çap miktarlarındaki kalınlaşma Şekil 4.2 (a ve b)'de görüldüğü gibi dikey çubuklara oranla daha fazladır. Liu [128] yaptığı analizlerde geometrik kusurların yatay çubuklarda dikey çubuklara göre çok daha fazla olduğunu bulmuştur. Arabnejad ve diğerleri [129] çalışmasında tanelerin aşırı erimesinin, sarkan yatay desteklerin kalınlık değişimini önemli ölçüde etkilediğini söylemiştir.

SLM ile üretilmiş yapıların yüzeyleri pürüzsüz olmadığı bilinmektedir. Büyük çubukların üzerinde genellikle büyük miktarda kısmen erimiş metal tozları bulunur (Şekil 4.2 (c)). Yüzey kalitesi merdiven etkisi de göz önüne alındığı zaman sütunların eğim açısına duyarlıdır ve yukarı-aşağı bakan yüzeylerin kalitesini etkiler [132]. Termal enerji, sıcaklık gradyanı yönünde doğrudan eriyik katmanları arasında akar. Eğimli çubuklar, farklı termal gradyanlara ve çubuk yönelimlerine sahiptir, bu da dikey çubuklara kıyasla daha yavaş ısı transferine neden olur. Sonuç olarak, çıkıntılı yapının alt tarafında sıklıkla termal enerji birikimi görülür ve termal enerji birikimi malzeme yapısını değiştirir [133].



Şekil 4.2. (a) BCCZZ-0,5 kafes yapıdaki çubuk çapının ve çubuk yüzey tabakasının yüzeylerinin değişimi (b) FCCZZ-0,5 kafes yapıdaki çubuk çapının ve çubuk yüzey tabakasının yüzeylerinin değişimi (c) Kafeslerinin erimemiş veya kısmen erimiş toz parçacıklarına odaklanan dikmelerin büyütülmüş bir görünümü

Çizelge 4.2. Üretilen numunelerin deneysel çap ölçümleri

Numune Adı	Dış Çubuk Çapı	İç Çubuk Çapı
BCCZZ-0,4	$0,444 \pm 0,016$	$0,412 \pm 0,006$
BCCZ-0,5	$0,583 \pm 0,021$	-
BCCZZ-0,5	$0,567 \pm 0,014$	$0,543 \pm 0,013$
BCCZZ-0,6	$0,672 \pm 0,023$	$0,655 \pm 0,021$
FCCZZ-0,4	$0,474 \pm 0,027$	$0,450 \pm 0,015$
FCCZ-0,5	$0,555 \pm 0,015$	-
FCCZZ-0,5	$0,559 \pm 0,029$	$0,538 \pm 0,020$
FCCZZ-0,6	$0,689 \pm 0,037$	$0,653 \pm 0,011$

4.2. Kafes Yapıların Deneysel Basma Testleri Sonuçları

BCCZ – BCCZZ ve FCCZ – FCCZZ kafes yapıları 0,5 gerinim değerine kadar basma testine maruz bırakılmış ve elde edilen nominal gerilme-gerinim eğrileri BCCZ-BCCZZ yapıları için Şekil 4.3'te ve FCCZ-FCCZZ için Şekil 4.4'te verilmiştir. Her gruptaki üç numunenin eğrileri birbirine oldukça benzer olduğundan grup başına yalnızca temsili bir eğri kullanılacak şekilde gösterim yapılmıştır. Nominal gerilme değerleri Eş. 4.1, birim şekil değiştirme değeri Eş. 4.2 ile hesaplanır:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

F ölçülen kuvvet değeridir ve A_0 , kafes örneğinin ilk kesit alanıdır. Yani A_0 olarak Çizelge 4.1'de gösterilen Kalınlık x En değerleri kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

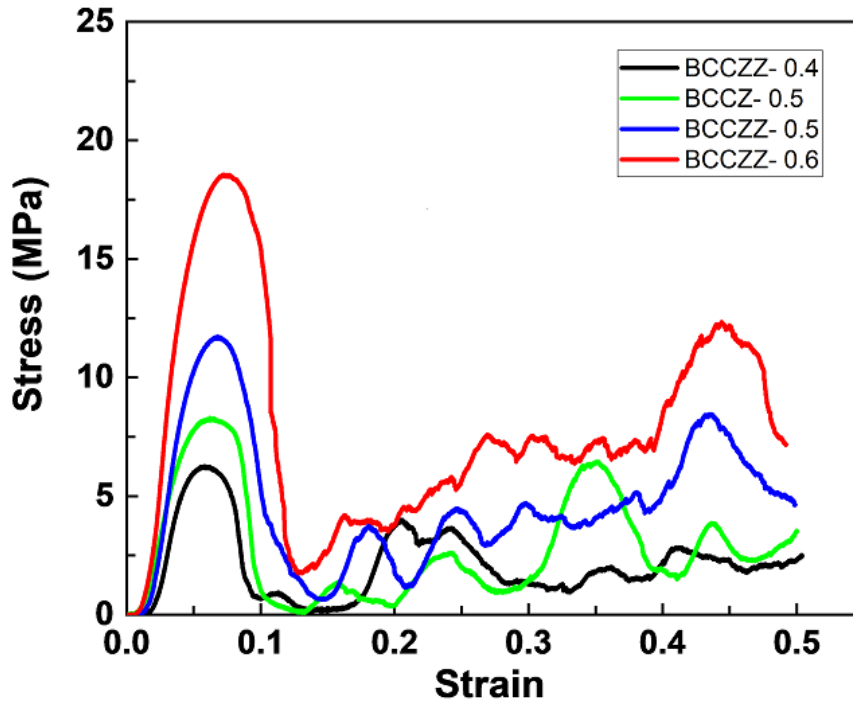
ΔL , cismin uzunluğundaki değişim ve L_0 , cismin başlangıç uzunluğudur. Kafes yapılarının, topolojilerine göre yükleme sonucuna eğilme veya uzama-baskın bir davranış sergiledikleri bilinmektedir.

Kafes numunelerinin yarı statik gerilme-gerilme eğrilerinde ana üç aşama görülmektedir. Bunlar; elastik kısım (elastik-plastik deformasyon bölgesi), sürekli değişim ve son yoğunlaşma bölgesidir [135, 136]. İlk yükleme elastik bir deformasyona neden olur ve bu lineer aşamanın eğimi elastisite modül değerine karşılık gelir ve birim uzama başına gerilme olarak tanımlanmaktadır. Elastisite modülü Eş. 4.3 kullanılarak hesaplanmış ve hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.3' de verilmiştir.

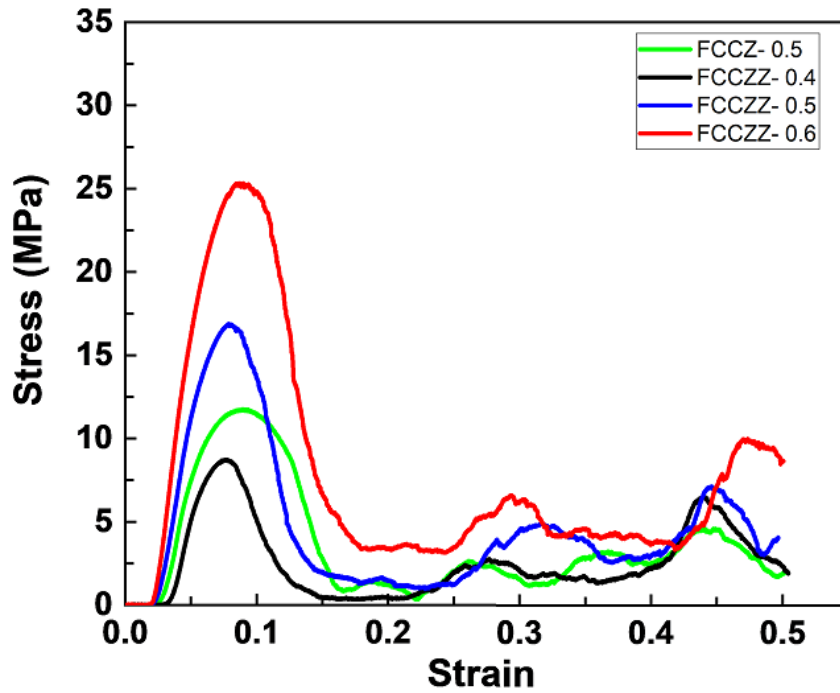
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

σ , nominal gerilme değeri, ε ise birim şekil değiştirme değeridir.

BCCZ-BCCZZ ve FCCZ-FCCZZ yapılar Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de görüldüğü gibi başlangıçtaki düşük birim şekil değiştirme değerlerinde, bir pik gerilme değerine ulaşır ardından ikinci bir pik değerinin başlangıcına kadar düşüş göstermektedir. Bu pik değeri ve sonrasında gerilme-gerinim grafiğinde görülen sürekli değişim üretilen kafes yapılarında uzama-baskın deformasyon mekanizmasının etkin olduğunu ve dikey çubukların burkulması ile çökmenin başladığını ortaya koymaktadır [137]. Ayrıca, yapıların çubuk çap büyüklüğü arttıkça gerilmedeki başlangıç pik değerinin de arttığı görülmektedir. (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4) Bu durum eklenen dikey çubuk ve çubuk çaplarının yük taşıma kapasitesine olan etkisini göstermektedir.



Şekil 4.3. BCCZ-BCCZZ yapılarının gerilme-gerinim grafiği



Şekil 4.4. FCCZ-FCCZZ yapılarının gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

4.2.1. BCCZ-BCCZZ Yapı

Şekil 4.3'te verilen BCCZ-BCCZZ gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde aynı çubuk çaplarına (0,5 mm) ve yakın bağıl yoğunluk değerlerine sahip BCCZ ve BCCZZ kafes yapılarından (BCCZ-0,5 ve BCCZZ-0,5) BCCZZ yapısının daha yüksek elastik modülü ve ilk tepe gerilme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın en heyecan verici sonucu, yeni BCCZZ tasarımının yüksek mekanik özellikleridir. Çizelge 4.3'te BCCZ-BCCZZ ve FCCZ-FCCZZ kafes yapılarından testlerde kullanılan numunelere ait özellikler ve elde edilen sonuçların özeti verilmiştir. Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.3'te görüleceği üzere BCCZZ-0,5 yapısının özgül dayanımı BCCZ-0,5 yapısından yaklaşık olarak 1,3 kat daha fazladır. BCCZZ-0,5'in ilk tepe gerilimi 12 MPa'a yakın olup bu değer BCCZ-0,5'in yaklaşık 1,5 katıdır. Yakın zamanda yapılan bir diğer çalışma, nümerik basma testi simülasyonlarına göre, BCCZ Ti-6Al-4V kafes yapısına iç dikey çubukların eklenmesinin özgül mukavemeti ve elastik modülü arttırdığını göstermiştir [138].

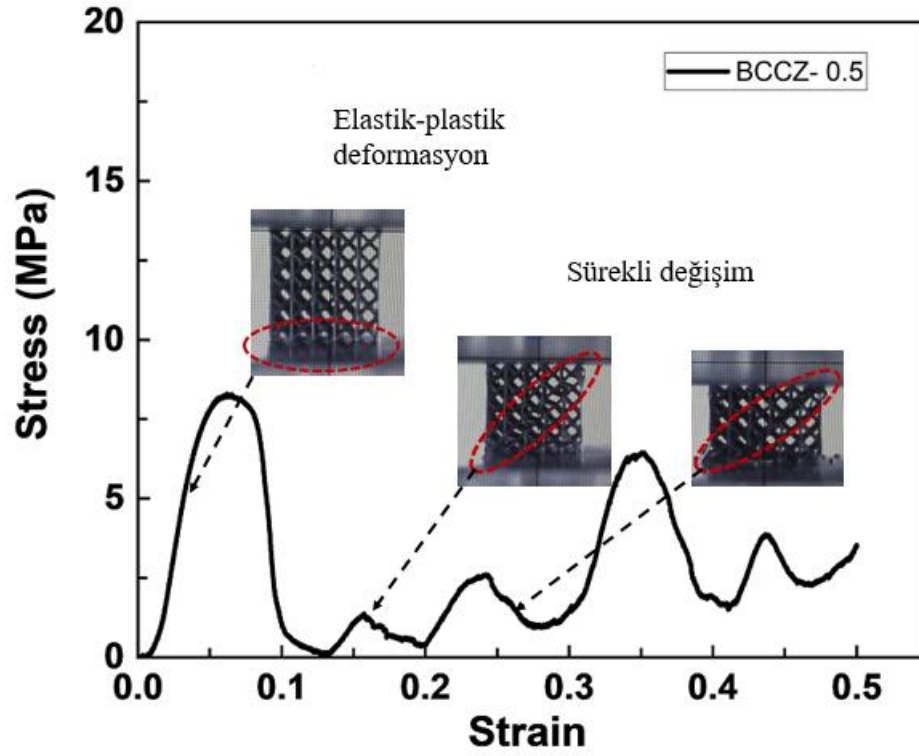
BCCZZ-0,6 yapısının ilk tepe gerilimi ise 20 MPa'a yakın, yani BCCZZ-0,5' in neredeyse 1,7 katı iken, emsallerine kıyasla daha yüksek bir elastik modül elde edilmiştir. BCCZZ-0,6 kafes tasarımı, üç kafes yapısının içerisinde en yüksek özgül taşıma kapasitesine sahip tasarım olmuştur.

Çizelge 4.2’de verilen bu sonuçlardan da görüleceği üzere BCCZZ-0,4 yapısı BCCZZ-0,5 ve BCCZZ-0,6 yapılarına kıyasla daha düşük özgül dayanım, pik gerilme ve elastisite modülüne sahiptir. Bu durum, çubuk çapının özgül dayanım üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Ekstra dikey çubuk eklemek, özgül dayanımı artırma için etkili bir seçenek olsa da çubuk çapı seçimi de oldukça önemlidir. BCCZ-0,4 ve BCCZ-0,5 sonuçları özelinde, özgül dayanım üzerinde çubuk çapı etkisinin ekstra çubuk etkisinden daha baskın olduğu görülmektedir. Bunun yanında, çubuk çapı etkisi denklemden çıkarılıp yalnızca ekstra çubuk etkisinin incelendiği koşul olan BCCZ-0,5 ve BCCZZ-0,5 kafes yapılarının sonuçları incelendiğinde oldukça az bir ağırlık artışına rağmen (yaklaşık %10) özgül dayanımda yüzdesel olarak (%40’dan fazla) çok ciddi bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum da bu tezde ortaya konulan tekniğin başarısını göstermektedir.

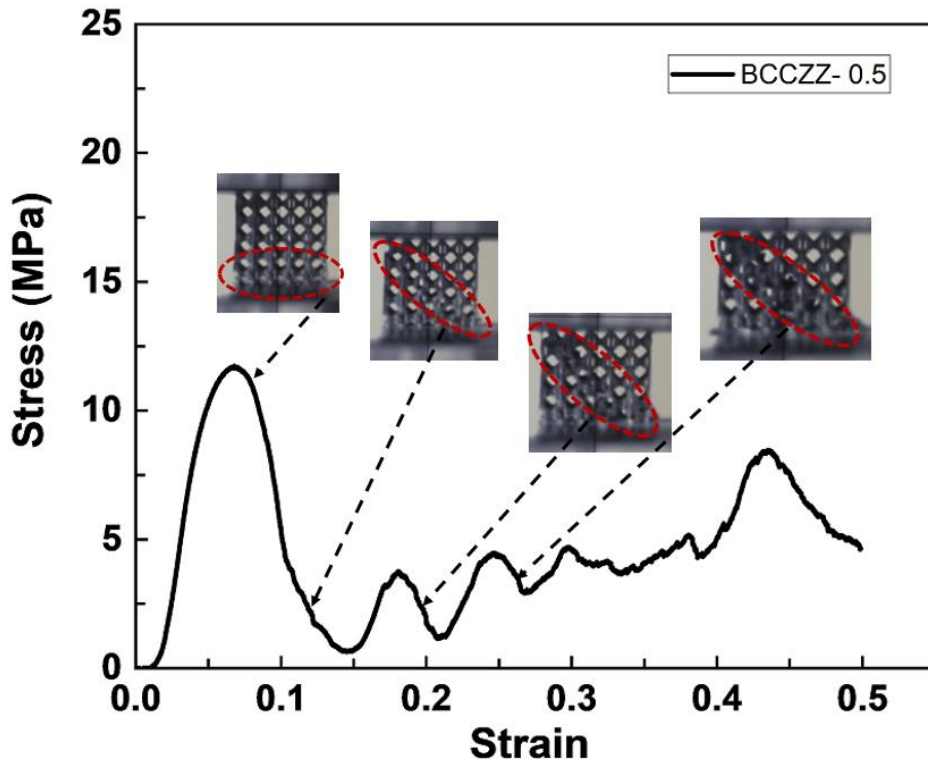
Çizelge 4.3. Kafes yapılar için deneysel sonuçlar

Numune Adı	En Yüksek (Pik) Gerilme (MPa)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Dayanım (MPa/(kg/m ³))	Bağlı Yoğunluk (ρ^* / ρ_s)	Elastisite Modülü (MPa)
BCCZ-0,5	8,17±0,04	284,17	0,0287	0,106±0,0001	125,49±8,99
BCCZZ-0,4	6,07±0,05	240,31	0,0252	0,090±0,0005	107,63±15,77
BCCZZ-0,5	11,63±0,19	318,88	0,0365	0,119±0,0058	177,04±20,08
BCCZZ-0,6	18,73±0,16	391,04	0,0486	0,146±0,0171	207,79±54,94
FCCZ-0,5	11,57±0,11	258,68	0,0447	0,096±0,0001	148,44±6,96
FCCZZ-0,4	8,75±0,12	220,01	0,0397	0,082±0,0005	121,26±3,03
FCCZZ-0,5	16,55±0,11	314,44	0,0526	0,117± 0,0009	187,63±15,91
FCCZZ-0,6	25,40±0,27	408,73	0,0621	0,153±0,0002	250,65±10,80

Deneysel olarak tüm kafeslerde iki farklı uzama-baskın hücre tabakası ve çubuk kırılma modu gözlemlenmiştir. Bunlar, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da BCCZ ve BCCZZ kafeslerin gerilme-gerinim eğrilerinde ve çeşitli gerinimlerdeki deformasyon görselleri verilmiştir.



Şekil 4.5. BCCZ-0,5 numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerinimlerdeki şekil değiştirme örnekleri

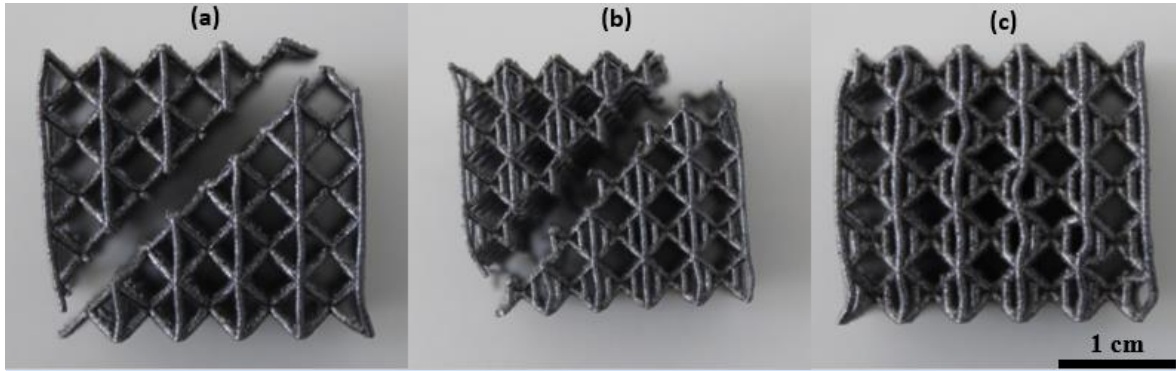


Şekil 4.6. BCCZZ-0,5 numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerilmelerdeki şekil değiştirme örnekleri

Elastik deformasyon modunda, katmanlar hücre kenarları arasındaki çubukların burkulmasıyla üretim yönünde sıkıştırıldığı için uzama-baskın yanal tabaka ezme modu oluşmaktadır [6]. Hücre kenarlarındaki nispeten yüksek yük konsantrasyonu hücre kenarının çatlamasına, kırılmasına ve ayrıca dikmelerin hücre kenarlarından ayrılmasına neden olmuştur ($\varepsilon \leq 0,1$). Sürekli değişimde ise, gerilim lokalizasyonu, diyagonal bir ekseninde (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te kırmızı çizgilerle gösterilen yükleme eksenine 45° açıda) kırılma başlamıştır ($\varepsilon \leq 0,2$). Tabaka çökmesi, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, uzama-baskın diyagonal tabaka ezme modu aşamalı ve sıralı olarak gerçekleşmiştir ($\varepsilon \leq 0,3$). Çapraz eksenindeki çubuklar, diğer çubuklara nispeten yüksek bükülme kuvvetlerine maruz kalır, bundan dolayı Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da açıkça görüldüğü üzere büyük ölçüde kırılır.

Şekil 4.7'de ($\varepsilon = 0,15$) gerinim değerinde üç ayrı kafes yapının deformasyon şekilleri verilmiştir. BCCZ-0,5 kafes yapısı 0,15 gerinim değerinde diyagonal olarak bir hücre boyutu kadar ezilmiştir. BCCZZ-0,5 kafes yapısı ise diyagonal ekseninde kırılmaya başlamıştır. BCCZZ-0,6 kafes yapısı ise aynı değerde henüz hücre kenarlarından

çubukların çatlama ve kırılması başlamıştır. Diyagonal tabaka ezme deformasyon modu daha önce gerilmenin hâkim olduğu EBM ile üretilmiş Ti-6Al-4V kafeslerinde çalışılmış [138-141], çapraz eksenlerdeki gerinim lokalizasyonunun bir hücre yüzeyi kenarının kırılmasıyla tetiklendiği görülmüştür. Diyagonal hücre katmanlarındaki geniş çubuk kırılması ve ayrılması, sonrasında ilk gerinim lokalizasyonundan sonra daha büyük bir yük düşüşüne neden olmaktadır.



Şekil 4.7. 0,15 gerinmesindeki şekil değiştirme örnekleri (a) BCCZ-0,5 kafes yapısı (b) BCCZZ-0,5 kafes yapısı (c) BCCZZ-0,6 kafes yapısı

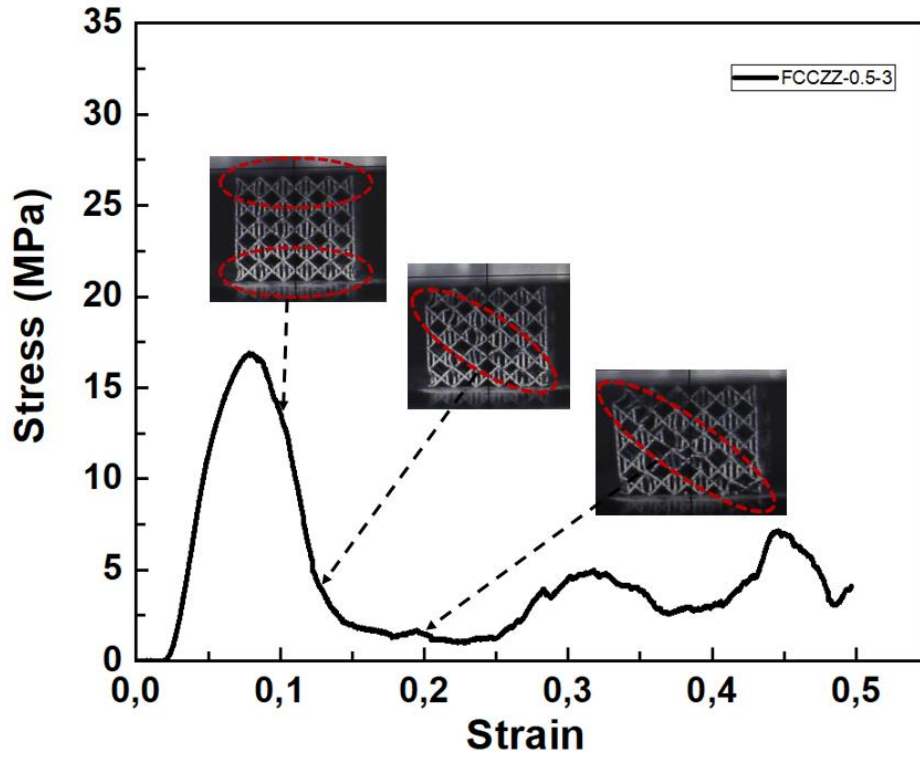
4.2.2. FCCZ-FCCZZ Yapı

Şekil 4.4'te verilen FCCZ-FCCZZ gerilme-gerinim grafiklerine bakıldığında FCCZZ-0,5 yapısının elastik modülü ve ilk tepe gerilme değerleri beklendiği gibi FCCZ-0,5 yapıdan daha büyüktür. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4'te görüldüğü üzere FCCZZ-0,5 yapısının özgül dayanımı FCCZ-0,5 yapısından yaklaşık olarak 1,2 kat, FCCZZ-0,6 yapısının özgül dayanımı ise FCCZZ-0,5 yapısından yaklaşık olarak 1,2 kat daha fazladır. FCCZZ-0,5 ilk tepe gerilimi 17 MPa' a yakın ve FCCZ-0,5'in yaklaşık 1,5 katıdır. FCCZZ-0,6 yapısının ilk tepe gerilimi 26 MPa' a yakın, yani FCCZZ-0,5'in neredeyse 1,6 katı iken, emsallerine kıyasla daha yüksek bir elastik modül elde edilmiştir. Bu nedenle, özgül tasarım olan FCCZZ-0,6 kafes tasarımı, üç kafes yapısının en yüksek özgül taşıma kapasitesine sahiptir.

BCCZZ-0,4 kafes yapısı gibi FCCZZ-0,4 yapısında diğer FCCZZ yapılarına göre düşük sonuçlara sahip olduğu Çizelge 4.3'de görülmektedir. Çubuk çaplarındaki değişimin yapıların mekanik özelliklerini etkilediği FCCZZ yapılarının sonuçlarından da açıkça görülmektedir. Ekstra dikey çubuk eklemek, özgül dayanımı artırma için etkili bir seçenek

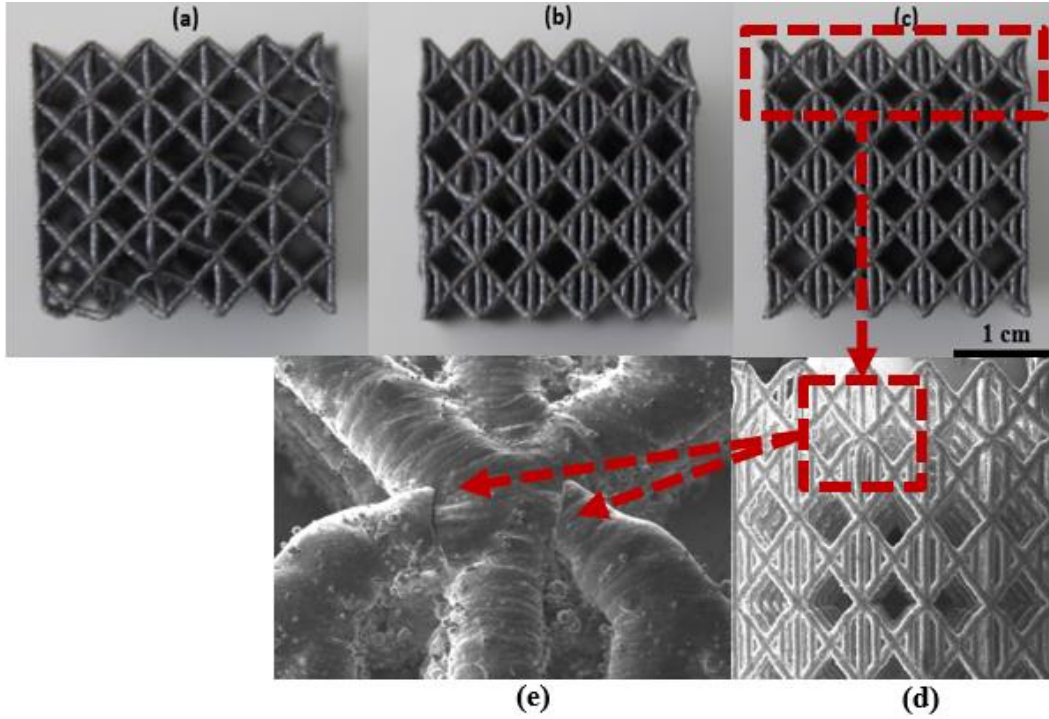
olsa da çubuk çapı seçimi de oldukça önemlidir. FCCZZ-0,6 kafes yapısının pik yaptığı gerilme değeri, özgül dayanımı ve elastik modül değerleri ile en yüksek sonuçları vermiştir. Aynı çubuk çaplarına (0,5) sahip FCCZ-FCCZZ yapılarının mekanik özelliklerine bakıldığında eklenen ekstra dikey çubuklar, özgül dayanım ve elastik modülde yaklaşık olarak sırasıyla %18 ve %26'lık bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Co-Cr alaşımından imal edilmiş FCCZ kafes yapılarına eklenen çubuklar ile oluşturulan FCCZZ yapısının basma test sonuçlarında da özgül dayanım ve elastik modülün sırasıyla %17 ve %50 oranında artış gösterdiği görülmüştür [139]. Ayrıca aynı hücre topolojisi ve çubuk çapına sahip FCCZ-0,5 için AlSi10Mg alaşımında 0,0447 (MPa/(kg/m³)) değerinde özgül dayanım elde edilirken Co-Cr alaşımında 0,0306 (MPa/(kg/m³)) değerinde özgül dayanım elde edilmiştir. Aynı çap değerine sahip diğer kafes yapı FCCZZ-0,5 için AlSi10Mg alaşımında 0,0526 (MPa/(kg/m³)) değerinde özgül dayanım elde edilirken Co-Cr alaşımında 0,0361 (MPa/(kg/m³)) değerinde özgül dayanım elde edilmiştir. AlSi10Mg alaşımının Co-Cr alaşımına göre daha hafif olması özgül dayanım açısından daha avantajlı olduğunu gösterir.

FCCZZ yapı gerilme-gerinim grafiği ve çeşitli gerinimlerdeki şekil değiştirme örnekleri Şekil 4.8'de verilmiştir. FCCZZ yapılar BCCZ-BCCZZ yapılarına benzer davranış sergilemiştir. Tüm kafes yapılar için yüklemenin başlangıcında bir pik gerilme değeri oluşmaktadır, büyük çap değerine sahip özgül yapıların pik değerleri beklendiği üzere çok daha büyük değerlere sahiptir. FCCZZ yapının deformasyon gelişimi BCCZZ yapıya benzediği görülmektedir. Şekil 4.8'de verildiği gibi deformasyon kafes yapıların alt ve üst kısımlarında hücre kenarı kırılması, dikmelerin hücre kenarlarından ayrılmasıyla başlamış daha sonra diyagonal kesme bantları şeklinde gelişmiştir ($\epsilon \leq 0,2$). Tabaka çökmesi, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, uzama-baskın diyagonal tabaka ezme modu BCCZ-BCCZZ kafes yapılarındaki gibi aşamalı ve sıralı olarak gerçekleşmiştir ($\epsilon \leq 0,3$).



Şekil 4.8. FCCZZ yapı gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve çeşitli gerilmelerdeki şekil değiştirme örnekleri

Şekil 4.9'da ($\epsilon = 0,15$) gerinim değerinde üç ayrı kafes yapının deformasyon şekilleri verilmiştir. FCCZ-0,5 kafes yapısı 0,15 gerinim değerinde diyagonal olarak dikey çubukların kırılması başlamıştır. FCCZZ-0,5 kafes yapısı ise alt ve üst hücrelerin kenarlarından ve diyagonal ekseninde dikey çubuklar kırılmaya başlamıştır. FCCZZ-0,6 kafes yapısında ise aynı gerinim değerinde Şekil 4.9 (d ve e)'de görüldüğü gibi hücre kenarlarından çubukların çatlama ve kırılması başlamıştır.

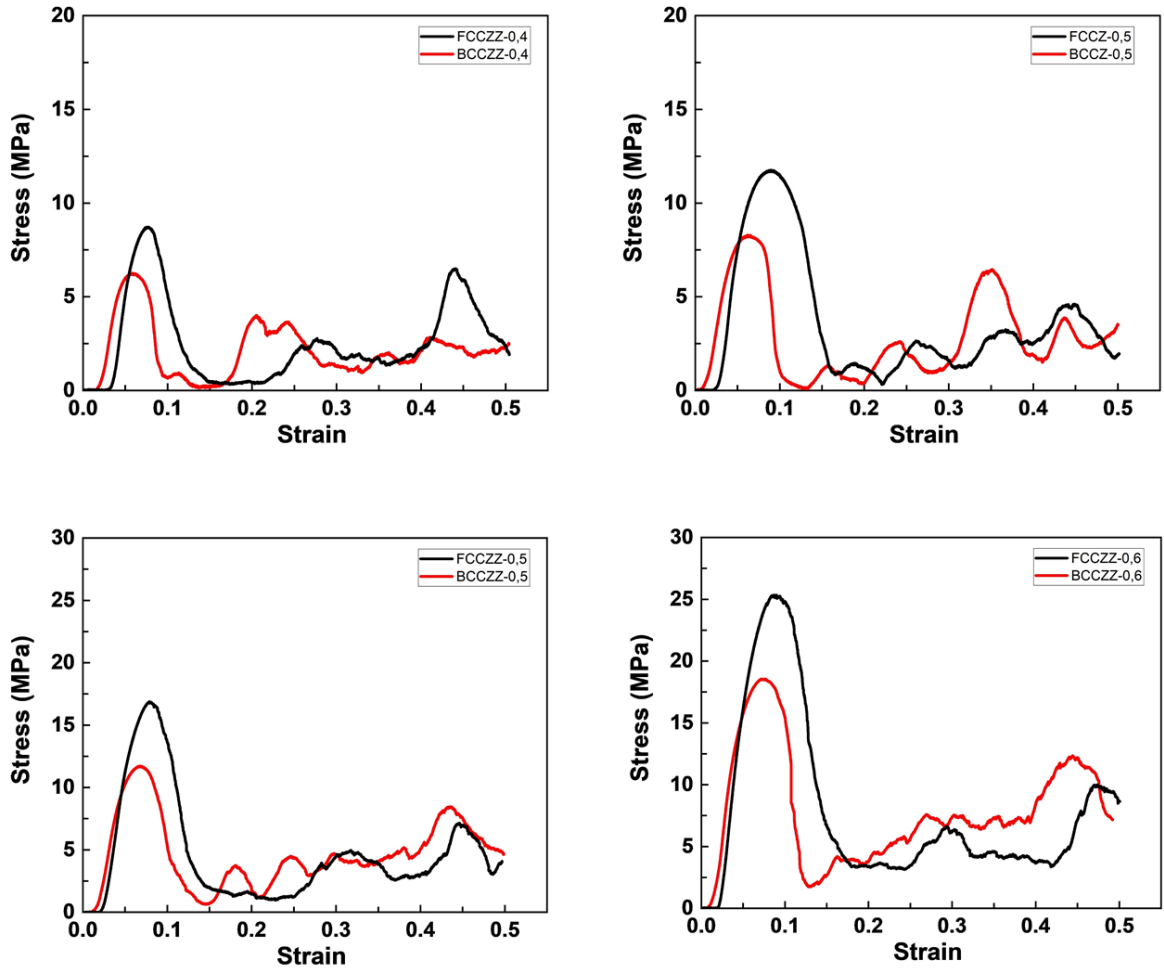


Şekil 4.9. 0,15 gerinmesindeki şekil değiştirme örnekleri (a) FCCZ-0,5 kafes yapısı (b) FCCZZ-0,5 kafes yapısı (c) FCCZZ-0,6 kafes yapısı (d) FCCZZ-0,6 SEM görüntüsü, (e) FCCZZ-0,6 düğüm noktası deformasyonuna odaklanmış görüntü

4.2.3. Farklı Kafes Yapılarının Davranış Karşılaştırılması;

FCCZ-FCCZZ ve BCCZ-BCCZZ yapılarının basma testleri sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Deneysel testlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiş, bu sonuçlar karşılaştırıldığında mekanik özelliklerin eklenen çubuklardan ve çubukların çap değerlerinden etkilendiği görülmektedir. Hem özgül dayanımları hem elastisite modülü açısından FCCZZ kafes yapıları en yüksek mekanik özellikleri sergilemekte iken, FCCZZ-0,4 ve BCCZZ-0,4 kafes yapıları en düşük özgül dayanım değerlerine sahiptir. Örneğin %15,3 bağıl yoğunluğa sahip FCCZZ-0,6 kafes yapısının özgül dayanımı, %14,6 bağıl yoğunluğa sahip BCCZZ-0,6 kafes yapısının 1,33 katıdır. FCCZZ-0,6 yapısı bu değerler ile özgül dayanımı ve elastisite modülü en yüksek olan yapıdır. %10,6 bağıl yoğunluğa sahip FCCZZ-0,5 kafes numunesinin özgül dayanım değeri, %9,6 bağıl yoğunluktaki BCCZZ-0,5 kafes yapısının 1,44 katıdır.

Bu çalışmada amaç tasarlanan yeni yapılar ile özgül dayanımı artırmak olmasından dolayı FCCZZ-BCCZZ (0,6 ve 0,5 mm) yapıları ile istenilen hedefe ulaşılmıştır. FCCZZ-0,4 kafes yapısı BCCZZ-0,4 kafes yapısından 1,6 kat daha fazla özgül dayanıma ve 1,12 kat elastik modüle sahiptir. Ancak tüm geometriler içerisinde en düşük sonuçlar bu iki yapıya aittir.



Şekil 4.10. Farklı kafes yapıların birbiri ile karşılaştırılması

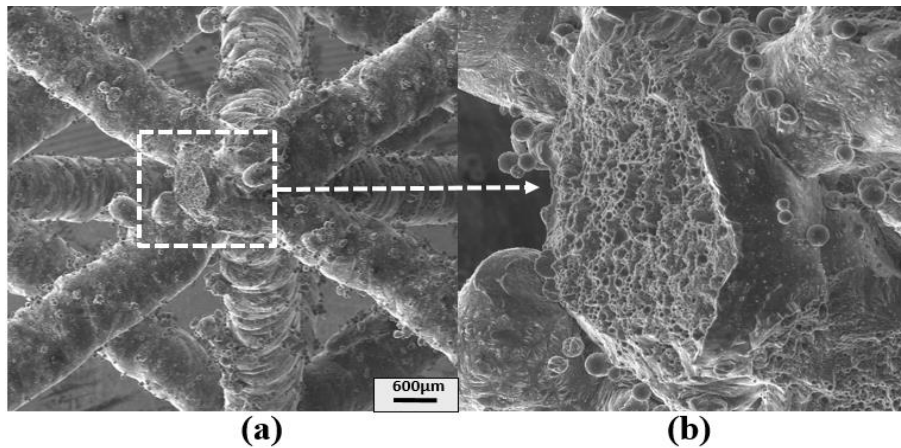
FCCZZ kafes yapısının bu yüksek performansı daha önce bahsedildiği gibi hem hücre topolojisinin yüzey merkezinden olması hem de hücre kenar ve ortalarından geçen dikey çubukların varlığından ve bu dikey çubukların eğilme momentinden ziyade eksenel bası yükü taşımasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bağıl yoğunluktaki artış FCCZZ numunelerin mekanik özelliklerini de beraberinde artırmaktadır.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.9’da aynı gerinim değerinde iki farklı hücre topolojisine sahip altı farklı kafes yapının karşılaştırmasına bakıldığında FCCZ-FCCZZ yapılarının BCCZ-

BCCZZ yapılarına kıyasla özgül dayanımlarının çok daha fazla olduğunu görülmektedir. BCCZ-0,5 yapısı aynı gerinim değerinde FCCZ-0,5 yapısıyla kıyaslandığında daha fazla kırıldığı görülmektedir. FCCZZ-0,5 yapısında çatlama ve kısmen kırılmalar başlarken BCCZZ-0,5 yapısı diyagonal ekseninde kırılmıştır. FCCZZ-0,6 yapısı hücre kenarlarından ayrılmaya başlamışken BCCZZ-0,6 yapısının çubuklarında burkulma ve kırılmalar başlamıştır. Sonuç olarak yük taşıma kabiliyeti FCCZ-FCCZZ yapılarında daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

4.3. Numunelerin Deneysel Test Sonrası SEM Görüntüleri

Şekil 4.11’de deformasyon işleminden sonra kafes yapının çubuklarının kırılma yüzeyi incelenmiştir. Şekil 4.11 (b)’de kırılma yüzeyinin daha da büyütülmüş hali verilmiştir. Kırılma, çoğunlukla katı kafes çubuklarının (düğüm) eklem noktalarında meydana gelmiştir. Kırığın gözenekli (Şekil 4.11 (b)) bölgelerde gerçekleştiği görülmektedir. Benzer sonuçlar, önceki araştırma çalışmalarında da [142-144] rapor edilmiştir. Bu çalışmalarda, SLM ile üretilen alüminyum alaşımlı kafes yapılarda kırılmanın genellikle, gözenek açıklığı ve sünek çukurların bir kombinasyonu ile oluştuğu ve çoğunlukla katı çubukların düğüm noktalarında meydana geldiği bildirilmiştir.



Şekil 4.11. (a) Katı kafes çubuklarının deformasyon sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü, (b) (a)’da çizgili dikdörtgen ile gösterilen bölgenin büyütülmüş resmi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstride kullanılacak parçaların üretilmesinde önemli bir alternatif olan ve beraberinde getirdiği tasarım kısıtlarının ortadan kaldırılması, daha az malzeme kullanılarak daha hafif ve hedef beklentiye uygun parçalar üretilmesi gibi avantajları da beraberinde getiren seçici lazer ergitme yöntemiyle AlSi10Mg alaşımından üretilen farklı kafes yapıların mekanik davranışları genel bir incelemeye tabi tutulmuştur. Seçici lazer ergitme ile AlSi10Mg kullanılarak üretilen kafes yapılarının deformasyon mekanizmalarını ve kırılma davranışlarını incelemek için, dikey çubuk destekli yüzey merkezli kübik (FCCZ) ve dikey çubuk destekli hacim merkezli kübik (BCCZ) hücre topolojileri seçilmiştir. FCCZ-BCCZ ve bu yapılara eklenen dikey çubuklar ile özgül yapılar olan FCCZZ ve BCCZZ kafes numuneleri üç farklı çubuk çapına sahip olarak tasarlanmış sonrasında üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen tüm kafes numunelerine kafes malzemelerin mekanik davranışını karakterize etmeye yönelik deneysel statik basma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar özet halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Basma testleri sonucunda, genel olarak kafes yapıların gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin birbirine benzer davranışta olduğu görülmüştür. BCCZ-BCCZZ ve FCCZ-FCCZZ kafes yapılarda uzama-baskın çökme davranışı meydana geldiği deneysel sonuçlarda görülmektedir.
- Çalışılan malzeme için bağıl yoğunluk ve hücre topolojisinin mekanik davranışları etkileyen en etkin iki parametre olduğu deneysel çalışmalardan belirlenmiştir. Bağıl yoğunluk arttıkça bütün kafes yapıların özgül dayanımlarında ciddi artışlar meydana gelmiştir. Hücre topolojilerinde hücre kenarlarının kırılması ve çatlamasıyla oluşan deformasyon mekanizması diyagonal kesme bandı şeklinde gelişmektedir.
- Elastisite ve özgül dayanım açısından kafes yapıların karşılaştırılmasında en yüksek mekanik özelliklerin FCCZZ-0,6 kafes yapısına, en düşük sonuçların da BCCZZ-0,4 yapısına ait olduğu belirlenmiştir.
- Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kafes yapıların mekanik davranışlarının genel olarak birim hücrede mevcut dikey çubuklar tarafından kontrol edildiği gözlemlenmiştir. Dikey çubuk eklenmesiyle, BCCZ-0,5 kafes yapısının kütleinde %16'lık artışla birlikte pik gerilmesinde %61 oranında, özgül dayanımda ise %33 oranında bir artış görülmüştür. FCCZ-0,5 kafes yapısının kütleinde %20,5'luk bir

artışla birlikte, pik gerilmesinde %58 oranında artışın olduğu belirlenmiştir. Özgül dayanımında ise %18 oranında bir artış söz konusudur.

- Yük taşıma uygulamalarında kullanılmak üzere yeni bir hücre topolojisi tasarlanmış ve deneysel testler ile analiz edilmiştir. BCCZ ve FCCZ yapısına ekstra dikey çubukların eklenmesi, basma yükü altında özgül mukavemeti büyük ölçüde arttırmıştır. Bu durum, eşit çubuk çaplarına ve birbirine yakın kütlelere sahip yapılar arasındaki karşılaştırma ile açıkça tespit edilmiştir.
- Çalışmada aynı hücre tipi ve aynı hücre boyutu kullanıldığı durumda çubuk çapındaki değişiminin mekanik tepkileri nasıl değiştirdiği de incelenmiştir. Çubuk çapının 0,4 mm'den 0,5 mm ve 0,6 mm değerine artırılması ile çökme mukavemeti artmıştır. 0,4 mm çapındaki FCCZZ ve BCCZZ yapılarının ek çubuklara sahip olmasına rağmen BCCZ-0,5 ve FCCZ-0,5 yapılarından daha düşük özgül dayanımlara sahiptir. Bu durum, özgül dayanım üzerinde çubuk çapı etkisinin ekstra çubuk etkisini domine edebileceğini göstermiştir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerin seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen kafes yapıların mekanik davranışlarının anlaşılmasında önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmaya ek olarak mevcut kafes yapıların iyileştirilmesi ve daha iyi kafes yapıların elde edilebilmesi için aşağıdaki önerilerin dikkate alınmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

- Deneysel çalışmalar, optimum sonuçlar elde edilebilmesi adına diğer hücre topolojileriyle üretilen kafes yapılara uygulanabilir. Bu deneysel çalışmaların yanında teorik modeller oluşturularak sonlu elemanlar metodu ile analiz edilip sayısal sonuçlar ile kıyaslanabilir.
- Basma testlerine ek olarak aynı kafes topolojilerine sahip çekme numuneleri de üretilerek bu numunelere çekme testleri uygulanabilir. Böylece basma dayanımı dışında çekme dayanımları da tespit edilebilir
- Optimum kafes yapılar elde edebilmek için seçici lazer ergitme yöntemiyle farklı hücre boyutlarına, farklı çubuk çaplarına sahip kafes yapılar üretilip ve test edilebilir. Hafifliğinden dolayı yüksek özgül mukavemete sahip AlSi10Mg alaşımının kullanıldığı bu çalışmadan farklı olarak farklı alaşımlar ile kafes yapılar üretilip kullanım alanı genişletilebilir.

KAYNAKLAR

1. Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811-833
2. ASTM, (2012), *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, (F2792-12a), West Conshohocken, PA
3. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). The use of multiple materials in additive manufacturing. In *Additive manufacturing technologies* (pp. 436-449). Springer, Boston, MA
4. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224
5. Li, P., Ma, Y. E., Sun, W., Qian, X., Zhang, W., & Wang, Z. (2021). Fracture and failure behavior of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load. *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 107537.
6. Gümrük, R., & Mines, R. A. W. (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125-139
7. Tsopanos, S., Mines, R. A. W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W. J., Brooks, W., & Sutcliffe, C. J. (2010). The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(4).
8. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., & Raymont, D. (2014). Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 856-864.
9. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Huang, J., & Zhu, W. (2015). Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 238-246.
10. Cerardi, A., Caneri, M., Meneghello, R., Concheri, G., & Ricotta, M. (2013). Mechanical characterization of polyamide cellular structures fabricated using selective laser sintering technologies. *Materials & Design*, 46, 910-915.
11. Hahnen, R., & Dapino, M. J. (2014). NiTi–Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites. *Composites Part B: Engineering*, 59, 101-108.
12. Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2010). Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing. *Acta Materialia*, 58(13), 4305-4315.
13. Friel, R. J., & Harris, R. A. (2013). Ultrasonic additive manufacturing—a hybrid production process for novel functional products. *Procedia Cirp*, 6, 35-40.
14. Ravari, M. K., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., & Rezaei, R. (2014). Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154-161.
15. Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., & Moosavi, H. J. P. C. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia Cirp*, 6, 521-526.

16. Laurençon, M., De Resseguier, T., Loison, D., Baillargeat, J., Ngnekou, J. D., & Nadot, Y. (2019). Effects of additive manufacturing on the dynamic response of AlSi10Mg to laser shock loading. *Materials Science and Engineering: A*, 748, 407-417.
17. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.
18. Rosker, P., & Shellabear, M. (2004). E-manufacturing with laser-sintering-to series production and beyond. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej. Konferencje*, 85(42), 205-212.
19. Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., ... & Es-Said, O. S. (2011). Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al4V. *Journal of materials engineering and performance*, 20(2), 203-212.
20. Bertsch, A., Bernhard, P., Vogt, C., & Renaud, P. (2000). Rapid prototyping of small size objects. *Rapid Prototyping Journal*.
21. Chartier, T., & Badev, A. (2013). *Handbook of Advanced Ceramics: Chapter 6.5. Rapid Prototyping of Ceramics*. Elsevier Inc. Chapters.
22. Colosimo, B. M., Politecnico di Milano University, Department of Mechanical Engineering. Lecture Notes, Introduction to additive manufacturing [PowerPoint Sunum].
23. Cotteleer, M., & Joyce, J. (2014). 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. *Deloitte Review*, 14(1), 3-19.
24. Bertsch, A., Bernhard, P., Vogt, C., & Renaud, P. (2000). Rapid prototyping of small size objects. *Rapid Prototyping Journal*.
25. Chartier, T., & Badev, A. (2013). Rapid prototyping of ceramics.
26. Model Yap, Erişim Tarihi: 0.09.2022, <https://www.modelyap.com/3d-teknolojimiz/prototip-uretim-ve-hizli-prototipleme/>, URL'den erişim
27. Sürmen, H. K. (2019). EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
28. CustomPartNet, (2008), Erişim Tarihi: 20.08.2022, <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication> , URL'den erişim
29. 3D Visdesign, (2013), Erişim Tarihi: 20.08.2022, <https://3dvisdesign.com/3d-printing-next-billion-dollar-industry/> , URL'den erişim
30. Model Hermann Siegen, Erişim Tarihi: 20.08.2022, <https://www.modellbau-hermann.de/leistungen/rapid-prototyping/laminated-object-manufacturing-lom.html> , URL'den erişim
31. Sinkora, E. (2017). The pluses and minuses of combining additive & subtractive machining. Erişim Tarihi: 21.09.2022 <http://advancedmanufacturing.org/pluses-minuses-combining-additive-subtractive-machining/> , URL'den erişim
32. Chua, C. K., & Leong, K. F. (2014). *3D Printing and additive manufacturing: Principles and applications (with companion media pack)-of rapid prototyping*. World Scientific Publishing Company.

33. GE Additive, (2022), Erişim Tarihi: 20.08.2022, <http://www.arcam.com/solutions/creating-value-additive-manufacturing/> , URL'den erişim
34. Meiners, W., Wissenbach, K. ve Gasser, A. (2001). U.S. Patent No. 6,215,093. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
35. Shirazi, S. F. S., Gharehkhani, S., Mehrli, M., Yarmand, H., Metselaar, H. S. C., Kadri, N. A., & Osman, N. A. A. (2015). A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Science and technology of advanced materials*, 16(3), 033502.
36. 3D Priting Systems, Erişim Tarihi: 19.08.2022, <http://3dprintingsystems.com/additive-manufacturing-using-metals/> , URL'den erişim
37. EOS, Erişim Tarihi: 20.09.2022, https://www.eos.info/systems_solutions/metal , URL'den erişim
38. Sing, S. L., Yeong, W. Y., Wiria, F. E., & Tay, B. Y. (2016). Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method. *Experimental Mechanics*, 56(5), 735-748.
39. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4), 041101.
40. Emmelmann, C., Kranz, J., Herzog, D., & Wycisk, E. (2013). Laser additive manufacturing of metals. In *Laser technology in biomimetics* (pp. 143-162). Springer, Berlin, Heidelberg.
41. Carroll, B. E., Palmer, T. A., & Beese, A. M. (2015). Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, 87, 309-320.
42. Brandl, E., Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B., & Leyens, C. (2011). Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solidstate laser and wire. *Materials & Design*, 32(10), 4665-4675.
43. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., ... & Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
44. Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in frictionstir welding–process, weldment structure and properties. *Progress in materials science*, 53(6), 980-1023.
45. Agrawal, B. K. (1988). *Introduction to engineering materials*. Tata McGraw-Hill Education.
46. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., & Seely, D. W. (2015). Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 644, 171-183.
47. Majumdar, J. D., Pinkerton, A., Liu, Z., Manna, I., & Li, L. (2005). Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel. *Applied Surface Science*, 247(1-4), 320-327.

48. Mahmood, K., & Pinkerton, A. J. (2013). Direct laser deposition with different types of 316L steel particle: a comparative study of final part properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(4), 520-531.
49. Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J., & Hetzner, D. (1997). The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components. *Jom*, 49(5), 55-60.
50. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
51. Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., & Buchannan, K. (2015). Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 648, 9-14.
52. Eren H., (2017), Al-Si Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Magnezyum Elementinin Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 466592.
53. AYDIN, H., GÖREN, R., & CENGİZ, N. M. (2020). İKİZ MERDANE YÖNTEMİ İLE 1XXX SERİSİ ALÜMİNYUM LEVHA ÜRETİMİNDEKİ PROSES PARAMETRELERİNİN ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 146-152.
54. Li, Y., Yue, Q., He, J., Zhao, F., & Wang, H. (2020). When will the arrival of China's secondary aluminum era?. *Resources Policy*, 65, 101573.
55. Wang, Y., Chen, X., Xiao, X., Vershinin, V. V., Ge, R., & Li, D. S. (2020). Effect of Lode angle incorporation into a fracture criterion in predicting the ballistic resistance of 2024-T351 aluminum alloy plates struck by cylindrical projectiles with different nose shapes. *International Journal of Impact Engineering*, 139, 103498.
56. L'Haridon-Quaireau, S., Laot, M., Colas, K., Kapusta, B., Delpech, S., & Gosset, D. (2020). Effects of temperature and pH on uniform and pitting corrosion of aluminium alloy 6061-T6 and characterisation of the hydroxide layers. *Journal of Alloys and Compounds*, 833, 155146.
57. EuropeanAluminium, (2019), Erişim Tarihi: 20.08.2022, <https://www.european-aluminium.eu/data/recycling-data/eu-exports-destination-of-aluminium-scrap/> , URL'den erişim
58. YURDAKUL, M., ÖZBAY, O., & Yusuf, İ. Ç. (2002). Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2), 1-23.
59. King J. R. (2001). *The Aluminium Industry*: Elsevier.
60. Belov N. A., Eskin D. G., Aksenov, A. A. (2005). *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys*: Elsevier.
61. Zolotarevsky V. S., Belov N. A., Glazoff M. V. (2007). *Casting Aluminum Alloys (Vol. 12)*: Elsevier Amsterdam.
62. Gan, J. Q., Huang, Y. J., Cheng, W. E. N., & Jun, D. U. (2020). Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al– Si alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(11), 2879-2890.

63. Li, M., Omura, N., Murakami, Y., Matsui, I., & Tada, S. (2020). A comparative study of the primary phase formation in Al–7 wt% Si and Al–17 wt% Si alloys solidified by electromagnetic stirring processing. *Materials Today Communications*, 24, 101006.
64. Wang, D., Zhang, X., Xu, S., Nagaumi, H., & Li, X. (2021). Improvement of mechanical properties in micro-alloying Al-Si-Mg-Zn cast alloy. *Materials Letters*, 283, 128810.
65. Ao, X., Xia, H., Liu, J., He, Q., & Lin, S. (2021). A numerical study of irregular eutectic in Al-Si alloys under a large undercooling. *Computational Materials Science*, 186, 110049.
66. Zhang, L., Chen, S., Li, Q., & Chang, G. (2020). Formation mechanism and conditions of fine primary silicon being uniformly distributed on single α Al matrix in Al-Si alloys. *Materials & Design*, 193, 108853.
67. Koju, R. K., & Mishin, Y. (2020). Atomistic study of grain-boundary segregation and grain-boundary diffusion in Al-Mg alloys. *Acta Materialia*, 201, 596-603.
68. Weng, Y., Ding, L., Jia, Z., & Liu, Q. (2021). Effect of combined addition of Ag and Cu on the precipitation behavior for an Al-Mg-Si alloy. *Materials Characterization*, 171, 110736.
69. Hernandez, F. C. R., Ramírez, J. M. H., & Mackay, R. (2017). *Al-Si alloys: automotive, aeronautical, and aerospace applications*. Springer.
70. Arockiasamy, A., German, R. M., Wang, P. T., Horstemeyer, M. F., Morgan, W., Park, S. J., & Otsuka, I. (2011). Sintering behaviour of Al-6061 powder produced by rapid solidification process. *powder metallurgy*, 54(3), 354-359.
71. Rodríguez-González, P., Fernández-Abia, A. I., Castro-Sastre, M. A., & Barreiro, J. (2020). Heat treatments for improved quality binder jetted molds for casting aluminum alloys. *Additive Manufacturing*, 36, 101524.
72. Li, P., Ma, Y. E., Sun, W., Qian, X., Zhang, W., & Wang, Z. (2021). Fracture and failure behavior of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load. *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 107537.
73. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2015). Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77-84.
74. Dallago, M., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., & Benedetti, M. (2019). On the effect of geometrical imperfections and defects on the fatigue strength of cellular lattice structures additively manufactured via Selective Laser Melting. *International Journal of Fatigue*, 124, 348-360.
75. Rosa, F., Manzoni, S., & Casati, R. (2018). Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting. *Materials & Design*, 160, 1010-1018.
76. Ates, G. C., Demirtunç, M., Göçer, A. C., Doğru, A. H., Gorguluarslan, R. M., Gökdağ, İ., & Yavaş, H. (2021, November). Design of a 3D Aerospace Bracket Using Lattice Structures and Topology Optimization for Additive Manufacturing. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 85581, p. V004T04A010). American Society of Mechanical Engineers.

77. Helou, M., & Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 243-261.
78. Sypeck, D. J. (2005). Cellular truss core sandwich structures. *Applied Composite Materials*, 12(3), 229-246.
79. Malcolm, C. C. (1997). U.S. Patent No. 5,635,562. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
80. Yang, Z., Peng, H., Wang, W., & Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly (ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of applied polymer science*, 116(5), 2658-2667.
81. Zhou, H., Li, B., & Huang, G. (2006). Sound absorption characteristics of polymer microparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(4), 2675-2679.
82. Hiles, M. (1989). U.S. Patent No. 4,808,469. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
83. Meinecke, E. A., & Schwaber, D. M. (1970). Energy absorption in polymeric foams. I. Prediction of impact behavior from instron data for foams with rate-independent modulus. *Journal of Applied Polymer Science*, 14(9), 2239-2248.
84. Kwon, Y. W., Cooke, R. E., & Park, C. (2003). Representative unit-cell models for open-cell metal foams with or without elastic filler. *Materials Science and Engineering: A*, 343(1-2), 63-70.
85. Bastawros, A. F., Bart-Smith, H., & Evans, A. G. (2000). Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(2), 301-322.
86. Cansizoglu, O., Cormier, D., Harryson, O., West, H., & Mahale, T. (2006). An evaluation of non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. In 2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
87. Cansizoglu, O., Cormier, D., Harryson, O., West, H., & Mahale, T. (2006). An evaluation of non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. In 2006 International Solid Freeform Fabrication Symposium.
88. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials & Design*, 183, 108137.
89. Li, S. J., Xu, Q. S., Wang, Z., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., & Murr, L. E. (2014). Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta biomaterialia*, 10(10), 4537-4547.
90. Xu, S., Shen, J., Zhou, S., Huang, X., & Xie, Y. M. (2016). Design of lattice structures with controlled anisotropy. *Materials & Design*, 93, 443-447.
91. Zhao, S., Hou, W. T., Xu, Q. S., Li, S. J., Hao, Y. L., & Yang, R. (2018). Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by electron beam melting for biomedical applications. In *Titanium in Medical and Dental Applications* (pp. 277-301). Woodhead Publishing
92. Geng, L., Wu, W., Sun, L., & Fang, D. (2019). Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157, 231-242.

93. Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (2001). Effective properties of the octettruss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747-1769.
94. Souza, J., Großmann, A., & Mittelstedt, C. (2018). Micromechanical analysis of the effective properties of lattice structures in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 53-69.
95. Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., & Brandt, M. (2017). Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM). In *Laser additive manufacturing* (pp. 119-161). Woodhead Publishing.
96. Sychov, M. M., Lebedev, L. A., Dyachenko, S. V., & Nefedova, L. A. (2018). Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology. *Acta Astronautica*, 150, 81-84.
97. Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., ... & Hague, R. J. (2018). Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing. *Polymer*, 152, 62-71.
98. Sychov, M. M., Lebedev, L. A., Dyachenko, S. V., & Nefedova, L. A. (2018). Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology. *Acta Astronautica*, 150, 81-84.
99. Abueidda, D. W., Al-Rub, R. K. A., Dalaq, A. S., Lee, D. W., Khan, K. A., & Jasiuk, I. (2016). Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces. *Mechanics of Materials*, 95, 102-115.
100. Kapfer, S. C., Hyde, S. T., Mecke, K., Arns, C. H., & Schröder-Turk, G. E. (2011). Minimal surface scaffold designs for tissue engineering. *Biomaterials*, 32(29), 6875-6882.
101. Prashanth, K. G., Scudino, S., Klauss, H. J., Surreddi, K. B., Löber, L., Wang, Z., ... & Eckert, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 590, 153-160.
102. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2012). Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177-185.
103. Vilaro, T., Colin, C., & Bartout, J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and materials transactions A*, 42(10), 3190-3199.
104. Al-Saedi, D. S., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., & Ponnusamy, P. (2018). Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM. *Materials & Design*, 144, 32-44.
105. Hedayati, R., & Sadighi, M. (2015). Bird strike: an experimental, theoretical and numerical investigation. Woodhead Publishing.
106. Gülcan, O. (2019). Kuş çarpmaları ve uçaklara etkileri üzerine bir gözden geçirme çalışması. *Mühendis ve Makina*, 60(696), 192-220.

107. Xiong, J., Mines, R., Ghosh, R., Vaziri, A., Ma, L., Ohrndorf, A., ... & Wu, L. (2015). Advanced micro-lattice materials. *Advanced Engineering Materials*, 17(9), 1253-1264.
108. Gümrük, R., & Mines, R. A. W. (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125-139.
109. Gümrük, R., Mines, R. A. W., & Karadeniz, S. (2013). Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 586, 392-406.
110. Ushijima, K., Cantwell, W. J., Mines, R. A. W., Tsopanos, S., & Smith, M. (2011). An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13(3), 303-329.
111. Gümrük, R., Mines, R. A. W., & Karadeniz, S. (2013). Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 586, 392-406.
112. Leary, M., Mazur, M., Williams, H., Yang, E., Alghamdi, A., Lozanovski, B., ... & Brandt, M. (2018). Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials & Design*, 157, 179-199.
113. Lei H, Li C, Meng J, Zhou H, Liu Y, Zhang X, Wang P and Fang D 2019 Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis *Mater. Des.* 169 107685
114. Gümrük, R., Mines, R. A. W., & Karadeniz, S. (2013). Static mechanical behaviours of stainless-steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 586, 392-406.
115. McKown, S. S. S. S., Shen, Y., Brookes, W. K., Sutcliffe, C. J., Cantwell, W. J., Langdon, G. S., ... & Theobald, M. D. (2008). The quasi-static and blast loading response of lattice structures. *International Journal of Impact Engineering*, 35(8), 795-810.
116. Smith, M., Cantwell, W. J., Guan, Z., Tsopanos, S., Theobald, M. D., Nurick, G. N., & Langdon, G. S. (2011). The quasi-static and blast response of steel lattice structures. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13(4), 479-501.
117. Shen, Y., McKown, S., Tsopanos, S., Sutcliffe, C. J., Mines, R. A. W., & Cantwell, W. J. (2010). The mechanical properties of sandwich structures based on metal lattice architectures. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 12(2), 159-180.
118. Pham, M. S., Liu, C., Todd, I., & Lertthanasarn, J. (2019). Damage-tolerant architected materials inspired by crystal microstructure. *Nature*, 565(7739), 305-311.
119. Feng, Q., Tang, Q., Liu, Z., Liu, Y., & Setchi, R. (2018). An investigation of the mechanical properties of metallic lattice structures fabricated using selective laser melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(10), 1719-1730.
120. Geng, X., Ma, L., Liu, C., Zhao, C., & Yue, Z. (2018). A FEM study on mechanical behavior of cellular lattice materials based on combined elements. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 188-198

121. Rashed, M. G., Ashraf, M., Mines, R. A. W., & Hazell, P. J. (2016). Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials & Design*, 95, 518-533.
122. Gümrük, R. E. C. E. P., & Mines, R. A. W. (2013). Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125-139.
123. Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., ... & Fang, D. (2019). Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis. *Materials & Design*, 169, 107685.
124. Tao, W., & Leu, M. C. (2016). Design of lattice structure for additive manufacturing. In 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA) (pp. 325-332).
125. Nsiempba, K. M., Wang, M., & Vlasea, M. (2021). Geometrical Degrees of Freedom for Cellular Structures Generation: A New Classification Paradigm. *Applied Sciences*, 11(9), 3845.
126. Mazur, M., Leary, M., Sun, S., Vcelka, M., Shidid, D., & Brandt, M. (2016). Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5), 1391-1411.
127. Leary, M., Mazur, M., Williams, H., Yang, E., Alghamdi, A., Lozanovski, B., ... & Brandt, M. (2018). Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials & Design*, 157, 179-199.
128. Liu, L., Kamm, P., García-Moreno, F., Banhart, J., & Pasini, D. (2017). Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geometric defects induced by Selective Laser Melting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 107, 160-184.
129. ARABNEJAD, S. (2016). BURNETT JOHNSTON R, PURA JA, SINGH B, TANZER M, PASINI D. High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints [J]. *Acta Biomaterialia*, 30, 345-356.
130. Gorguluarslan, R. M., & Gungor, O. U. (2020, November). Investigation of Spatial Variability on Strut Diameters of Additively Manufactured Lattice Structures. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 84485, p. V02AT02A041). American Society of Mechanical Engineers.
131. Santorinaios, M., Brooks, W., Sutcliffe, C. J., & Mines, R. A. W. (2006). Crush behaviour of open cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *WIT transactions on the built environment*, 85.
132. Vrána, R., Koutný, D., Paloušek, D., Pantělejev, L., Jaroš, J., Zikmund, T., & Kaiser, J. (2018). Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures. *Materials*, 11(9), 1763.
133. Delroisse, P., Jacques, P. J., Maire, E., Rigo, O., & Simar, A. (2017). Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting. *Scripta Materialia*, 141, 32-35.

134. 8. Stratasys, Erişim Tarihi: 19.08.2022, <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/mojo#content-slider-1>URL'den erişim
135. Li, Z. H., Nie, Y. F., Liu, B., Kuai, Z. Z., Zhao, M., & Liu, F. (2020). Mechanical properties of AlSi10Mg lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 192, 108709.
136. Jin, N., Wang, Y., Cheng, H., Cheng, X., & Zhang, H. (2022). Strain Rate and Structure Dependent Behavior of Lattice Structures of a Titanium Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 8(1), 57-72.
137. Gibson, L., J. ve Ashby, M., F., (1997). *Cellular Solids: Structure and Properties*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge
138. ŞEREMET, H., & BABACAN, N. INVESTIGATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF Co-Cr LATTICE STRUCTURES FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 286-291.
139. Babacan N., Seremet H., "Investigation of The Load-Bearing Capacity of Co-Cr Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(2): 286-291, (2022)
140. Yang, K., Wang, J., Jia, L., Yang, G., Tang, H., & Li, Y. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V lattice structures with high structural integrity under large compressive deformation. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(2), 303-308.
141. Cheng, X. Y., Li, S. J., Murr, L. E., Zhang, Z. B., Hao, Y. L., Yang, R., ... & Wicker, R. B. (2012). Compression deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy with cellular structures fabricated by electron beam melting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 16, 153-162.
142. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., & Hague, R. J. M. (2016). A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 264-274.
143. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., & Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials & Design*, 131, 112-120.
144. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., ... & Attallah, M. M. (2015). Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 628, 188-197.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞEREMET, Hübannur
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :
 Medeni hali :
 Telefon :
 e-mail :

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi/ Savunma Teknolojileri A.B.D.	Devam ediyor
Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2020
Lise	Sivas İMKB Anadolu Lisesi	2015

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018	TÜDEMSAŞ	Stajyer Öğrenci
2017	Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü	Stajyer Öğrenci

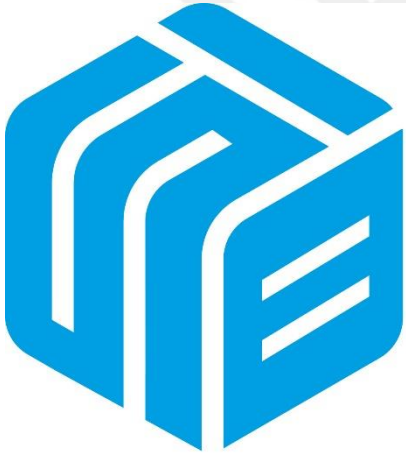
Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Seremet, H., Babacan, N., “Investigating the Dynamic compression response of a novel lattice topology via finite element analyses”, 2nd International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Karabuk, Turkey, Pages 44- 47, 2022.

Babacan N., Seremet H., “Investigation of The Load-Bearing Capacity of Co-Cr Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting” Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 6(2): 286-291, (2022).



**SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

KÖKLERDEN GÖKLERE...