

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI



STEREOLİTOGRAFI (SLA) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
NANOPARÇACIK KATKILI POLİMER KAFES YAPILARIN
MEKANİK VE TERMAL KARAKTERİZASYONU

BUĞRA ÖNLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

PROF. DR. MURAT SARIKAYA

II. DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH DAĞLI

SİNOP- 2025

TEZ KABUL

Buğra ÖNLER tarafından hazırlanan “**STEREOLİTOGRAFI (SLA) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NANOPARÇACIK KATKILI POLİMER KAFES YAPILARIN MEKANİK VE TERMAL KARAKTERİZASYONU**” başlıklı bu çalışma, 20.06.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY
Karabük Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi

İmza

**Üye
(Danışman)**

Prof. Dr. Murat SARIKAYA
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Prof. Dr. Ali ATEŞ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; 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 çalışmasında 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.

Buğra ÖNLER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

STEREOLİTOGRAFI (SLA) YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN NANOPARÇACIK KATKILI POLİMER KAFES YAPILARIN MEKANİK VE TERMAL KARAKTERİZASYONU

BUĞRA ÖNLER

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MURAT SARIKAYA

II. DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ SALİH DAĞLI

Eklemeli imalat yöntemleri, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerinden yola çıkarak polimerler, metaller, seramikler, kompozitler ve benzeri malzemelerle ardışık katmanlar halinde üretim gerçekleştiren bir imalat teknolojisidir. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, eklemeli imalat süreçleri malzeme israfını en aza indirerek daha sürdürülebilir bir üretim yaklaşımı sunmaktadır. Bu yöntemler arasında yer alan stereolitografi (SLA), sıvı haldeki fotopolimer reçinenin bir ışık kaynağı aracılığıyla katman katman sertleştirilmesi prensibine dayanır. SLA yöntemi, yüksek yüzey kalitesi, büyük doğruluk ve hassasiyet sağlaması nedeniyle, karmaşık geometrilere ve ince detaylara sahip bileşenlerin üretiminde oldukça avantajlıdır. Bu çalışmada, Al_2O_3 , hBN ve SiC nanopartikülleri katkılanarak SLA yöntemiyle üretilen kafes yapılarının ve numunelerin morfolojik, mekanik ve termal performansları araştırılmıştır. Çekme ve darbe numuneleri ile birlikte oktahedral, basit kübik ve elmas şeklinde tasarlanmış kafes yapılar, UV ile kürlenene bir fotopolimer reçine kullanılarak üretilmiştir. Farklı malzeme ve yapısal kombinasyonların performansını değerlendirmek amacıyla termogravimetrik analiz (TGA), türev termogravimetrik analiz (DTG) ve diferansiyel termal analiz (DTA) gerçekleştirilmiş; ayrıca çekme, basma ve Charpy darbe testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, hBN takviyeli numunelerin en yüksek çekme dayanımı ve termal kararlılığa sahip olduğunu, Al_2O_3 katkısının ise darbe direncini anlamlı ölçüde artırdığını göstermiştir. Buna karşılık, SiC katkısı sünekliğin azalmasına ve daha düşük termal direnç elde edilmesine yol açmıştır. Kafes yapıları arasında, basit kübik tasarım en yüksek basma dayanımını sergilerken, elmas yapılar sertlik ve süneklik açısından dengeli bir performans sunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) analizleri, nanopartiküllerin matris içerisinde homojen şekilde dağıldığını ve yapısal bütünlüğün korunduğunu ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELEER: Stereolitografi (SLA); Seramik takviyeli reçine; Kafes yapıları; Mekanik özellikler; Termal analiz; Polimer kompozit

Haziran 2025, 80 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERIZATION OF NANOPARTICLE-REINFORCED POLYMER SCAFFOLD STRUCTURES PRODUCED BY STEREOLITHOGRAPHY (SLA) METHOD

BUĞRA ÖNLER

SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR:PROF. DR. MURAT SARIKAYA

CO-SUPERVISOR:ASST. PROF. DR. SALİH DAĞLI

Additive manufacturing methods are a manufacturing technology that performs production in successive layers with polymers, metals, ceramics, composites and similar materials based on computer-aided design (CAD) models. Unlike traditional manufacturing methods, additive manufacturing processes offer a more sustainable manufacturing approach by minimizing material waste. Stereolithography (SLA), which is among these methods, is based on the principle of hardening liquid photopolymer resin layer by layer using a light source. The SLA method is quite advantageous in the production of components with complex geometries and fine details due to its high surface quality, great accuracy and precision.

In this study, the morphological, mechanical and thermal performances of lattice structures and samples produced by SLA method by doping with Al_2O_3 , hBN and SiC nanoparticles were investigated. Octahedral, simple cubic and diamond shaped lattice structures along with tensile and impact samples were produced using a UV curable photopolymer resin. Thermogravimetric analysis (TGA), derivative thermogravimetric analysis (DTG) and differential thermal analysis (DTA) were performed to evaluate the performance of different material and structural combinations; also tensile, compression and Charpy impact tests were applied.

The results showed that hBN reinforced samples had the highest tensile strength and thermal stability, while Al_2O_3 addition significantly increased the impact resistance. In contrast, SiC addition led to a decrease in ductility and lower thermal resistance. Among the lattice structures, the simple cubic design exhibited the highest compressive strength, while diamond structures provided a balanced performance in terms of hardness and ductility. Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analyses revealed that the nanoparticles were homogeneously distributed in the matrix and the structural integrity was preserved.

KEYWORDS: Stereolithography (SLA); Ceramic reinforced resin; Lattice structures; Mechanical properties; Thermal analysis; Polymer composite

June 2025, 80 Pages

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat SARIKAYA'ya ve bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren eş danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Salih DAĞLI'ya desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamda bana yardımcı olan değerli hocam Sayın Öğr. Gör. Yakup İRİM'e desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme ve hayatımın en önemli parçası canım eşime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)	4
2.1. Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi (ME).....	6
2.2. Doğrudan Enerji Depolama (DED)	7
2.3. Bağlayıcı Püskürtme (BJ) Yöntemi	8
2.4. Levha/Sac Laminasyonu.....	9
2.5. Toz Yataklı Ergitme (PBF).....	11
2.6. Malzeme Püskürtme (MJ).....	13
2.7. Fotopolimerizasyon Yöntemi	14
2.7.1. Dijital Işık İşleme (DLP)	14
2.7.2. Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)	15
2.7.3. Stereolitografi (SLA)	16
3. KAFES YAPILARI	19
3.1. Kafes Yapı Çeşitleri.....	20
3.1.1. Dikme Tabanlı Kafes Yapıları.....	20
3.1.2. Üçlü Periyodik Minimum Yüzey Kafes Yapıları (TPMS)	21
3.1.3. Kabuk Kafes Yapıları	23
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	24
5. MATERYAL VE YÖNTEM	32
5.1. Materyal.....	32
5.2. Yöntem.....	32
5.3. Numunelere Uygulanan Testler	34
5.3.1. Çekme Testi	34
5.3.2. Basma Testi.....	35
5.3.3. Çentik Darbe Testi	36
5.3.4. Termal Analizler (DTA, TG ve DTG).....	37
5.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	39

6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
6.1. EDX Analiz Sonuçları	40
6.2. SEM Analiz Sonuçları	42
6.3. Mekanik Test Sonuçları	46
6.3.1. Çekme Testi Sonuçları.....	46
6.3.2. Basma Test Sonuçları	49
6.3.3. Darbe Test Sonuçları	52
6.4. Termal Analiz Sonuçları	53
6.4.1. TGA Analizi Sonuçları	53
6.4.2. DTG Analizi Sonuçları	54
6.4.3. DTA Analizi Sonuçları	56
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	68



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması	2
Şekil 2.1 Eİ sürecindeki aşamalar	5
Şekil 2.2 Eİ yöntemlerinin özeti	6
Şekil 2.3 Ekstrüzyon tabanlı Eİ proses tiplerinin ana bileşenleri: (a) Filament tabanlı; (b) Piston tabanlı; (c) Vida tabanlı ekstrüzyon	7
Şekil 2.4 (a) DED imalat yönteminin şematik görünüşü, (b) Ürün	8
Şekil 2.5 BJ yönteminin şematik gösterimi	9
Şekil 2.6 LOM yönteminin şematik gösterimi (a) İki boyutlu görünüm (b) Perspektif görünümü	10
Şekil 2.7 SLM/SLS yöntemlerinin şematik gösterimi ve bu yöntemler ile üretilmiş parçalar.....	12
Şekil 2.8 EBM yönteminin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.9 (a) Malzeme püskürtme yönteminin şematik görünüşü, (b) Ürün	14
Şekil 2.10 DLP yönteminin şematik gösterimi	15
Şekil 2.11 a) SLA'nın yukarıdan aşağıya ve b) aşağıdan yukarıya mimarileri.....	18
Şekil 3.1 Kafes yapısının sınıflandırılması	20
Şekil 3.2 Üçlü periyodik minimal yüzeylerin örneği.....	22
Şekil 3.3 Kabuk kafes yapılar; a) SC-BCC, b) SC-BCC-FCC, c) SC-FCC	23
Şekil 5.1 Deneysel sürecin akış şeması	34
Şekil 5.2 ASTM D638-14 standardına uygun çekme test numunesi ölçüleri.....	34
Şekil 5.3 Çekme ve basma testlerinin gerçekleştirildiği cihaz	35
Şekil 5.4 Çentik darbe test cihazı.....	37
Şekil 5.5 Darbe test numunesinin ölçüleri	37
Şekil 6.1 PURE numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi	40
Şekil 6.2 Al ₂ O ₃ numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi	41
Şekil 6.3 SiC numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi.....	41
Şekil 6.4 hBN numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi	42
Şekil 6.5 Katkısız numuneye (PURE) ait SEM görüntüleri	43
Şekil 6.6 Al ₂ O ₃ numunesine ait SEM görüntüleri	44
Şekil 6.7 SiC numunesine ait SEM görüntüleri	45
Şekil 6.8 hBN numunesine ait SEM görüntüleri	46
Şekil 6.9 Toz katkılı ve katkısız çekme numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiği	48
Şekil 6.10 (a)Pure, (b)hBN nanopartikül katkılı, (c)Al ₂ O ₃ nanopartikül katkılı, (d)SiC nanopartikül katkılı numunelerin çekme test numunelerinin kopma yüzeyleri.....	48
Şekil 6.11 (a) PURE kafes yapılarının, (b) Al ₂ O ₃ tozlu kafes yapılarının, (c) hBN tozlu kafes yapılarının ve (d)SiC tozlu kafes yapılarının gerilme-şekil değiştirme grafikleri. 50	
Şekil 6.12 (a)basit kübik, (b)elmas ve (c)oktahedral kafes yapılarının nanopartikül katkılı ve katkısız gerilme-şekil değiştirme grafikleri	51
Şekil 6.13 Basit kübik kafes yapısının tek eksenli basma testi aşamaları	51
Şekil 6.14 Nanopartikül katkılı ve katkısız numunelerin darbe dirençleri	53
Şekil 6.15 Toz katkılı ve katkısız numunelerin TGA analiz sonuçları	54

Şekil 6.16 Toz katkılı ve katkısız numunelerin DTG analiz sonuçları	55
Şekil 6.17 Toz katkılı ve katkısız numunelerin DTA analiz sonuçları	57



TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Stereolitografinin iki ana mimarisinin avantaj ve dezavantajları	17
Tablo 3.1 Farklı TPMS birimlerinin matematiksel ifadeleri	22
Tablo 5.1 Ticari fotokürlenebilir reçinenin özellikleri	32
Tablo 5.2 Kullanılan seramik tozların özellikleri	32
Tablo 5.3 SLA 3D baskı parametreleri	33
Tablo 5.4 Kullanılan kafes yapılarının geometrik parametreleri	36
Tablo 6.1 Numunelerin mekanik özellikleri	47



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Eİ	: Eklemeli İmalat
hBN	: Hekzagonal Bor Nitrür
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
SiC	: Silisyum Karbür
OCT	: Oktahedral
SC	: Basit Kübik
DIA	: Elmas
BCC	: Hacim Merkezli Kübik
FCC	: Yüzey Merkezli Kübik
TPMS	: Üçlü Periyodik Minimum Yüzey Kafes Yapıları
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
3D	: Üç Boyutlu
SLA	: Stereolitografi
DLP	: Dijital Işık İşleme
CDLP	: Sürekli Dijital Işık İşleme
UV	: Ultraviyole
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
DMLS	: Direkt Metal Lazer Sinterleme
EBM	: Elektron Işını ile Ergitme
PBF	: Toz Yataklı Ergitme
MJ	: Malzeme Püskürtme
ME	: Malzeme Ekstrüzyonu
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
FDM	: Eriyik Yığarak Modelleme
FFF	: Erimiş Filament Üretimi
DED	: Doğrudan Enerji Depolama
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme
LOM	: Lamine Nesne Üretimi
UAM	: Ultrasonik Katkı İmalatı
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
TGA	: Termogravimetrik Analiz
DTG	: Türevsel Termogravimetrik Analiz
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

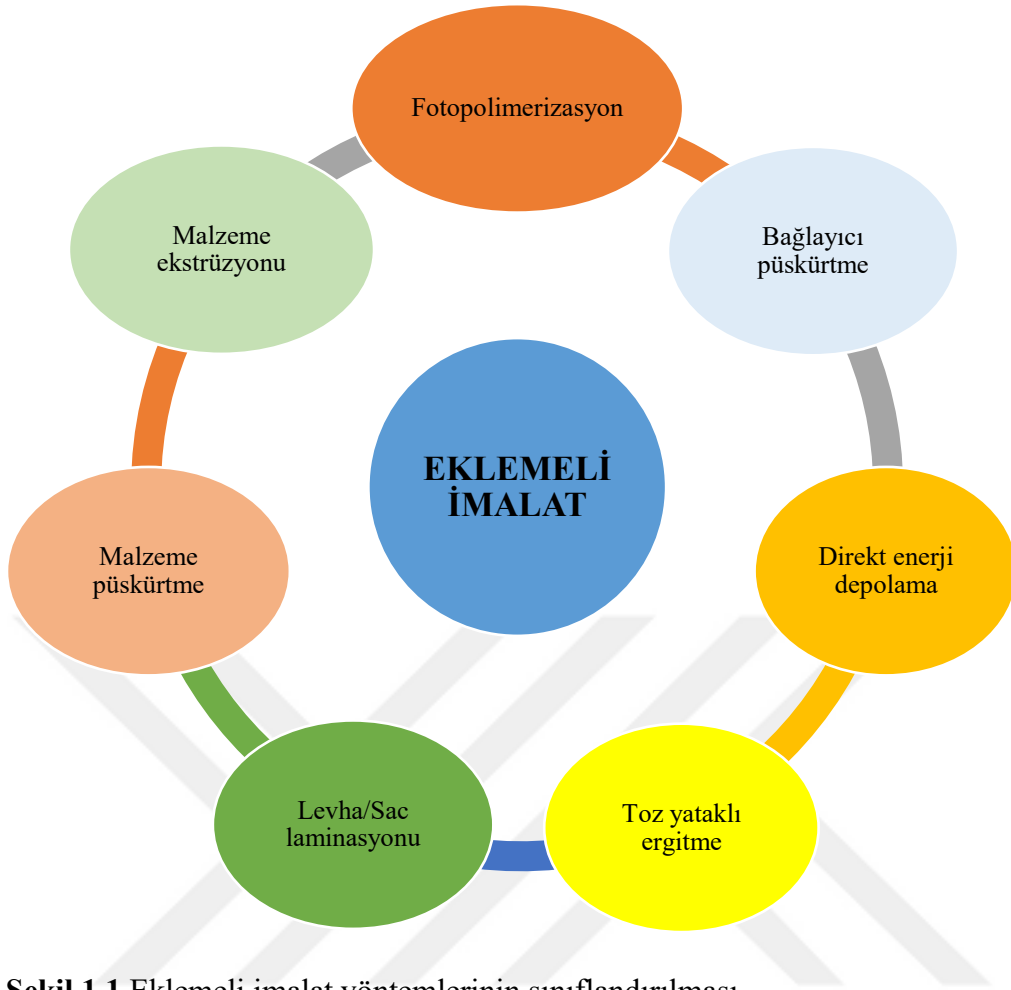
1. GİRİŞ

İmalat, bir hammaddenin belirli ihtiyaçlara göre işlenerek yeni bir ürün hâline getirilmesi sürecidir. İnsanlık tarihinde, doğrudan doğadan karşılanamayan gereksinimlerin artmasıyla birlikte imalat faaliyetleri önem kazanmıştır. İlk dönemlerde tamamen insan gücüne dayanan bu süreç, teknolojik ilerlemelerle birlikte makineleşmiş ve zamanla gelişmiş üretim sistemlerine evrilmiştir.

Sanayi tarihinde dört önemli devrim yaşanmıştır. Birinci sanayi devrimi, 1764 yılında James Watt tarafından geliştirilen buhar makinesinin sanayide kullanılmasıyla başlamış ve insan gücünün yerini makine gücüne bırakmasına neden olmuştur. İkinci sanayi devrimi, elektriğin üretim süreçlerine entegrasyonu ile gerçekleşmiştir. Üçüncü sanayi devrimi ise bilgi teknolojilerindeki ilerlemelerle üretim sistemlerinin otomasyona geçmesini sağlamıştır. Günümüzde ise dördüncü sanayi devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0 çağındayız. Bu yeni dönemde, akıllı otomasyon sistemleri ile dijitalleşmenin üretim süreçlerine entegrasyonu, küresel rekabette belirleyici bir unsur hâline gelmiştir (Dilberoglu vd., 2017).

Geleneksel imalat yöntemleri, genellikle malzemenin istenilen geometriye ulaşması için katı bir bloktan çıkarılması esasına dayanır. Buna karşın Eklemeli İmalat (Eİ), üç boyutlu (3D) nesneleri bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine dayanarak katman katman inşa eden bir üretim yöntemidir. Bu yöntem ilk olarak 1980'lerde hızlı prototipleme amacıyla geliştirilmiş, günümüzde ise ürün geliştirme süreçlerinde yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Wong & Hernandez, 2012).

Eklemeli imalat; polimerler, metaller, seramikler ve kompozitler gibi çeşitli malzemelere uygulanabilirliği, israfı minimize etmesi ve tasarım özgürlüğü sağlamasıyla öne çıkmaktadır (Ge vd., 2020). Bu avantajlar sayesinde özellikle havacılık, otomotiv, biyomedikal ve enerji sektörlerinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), eklemeli imalat süreçlerini yedi ana kategoriye ayırmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması

Eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan Stereolitografi (SLA), 1986 yılında Charles Hull tarafından geliştirilmiştir (Hull, 1986). Bu yöntemde, sıvı fotopolimer reçineler yoğunlaştırılmış ultraviyole (UV) lazer ile seçici olarak katılaştırılarak üç boyutlu nesneler elde edilir. SLA yöntemi; yüksek yüzey kalitesi, hassasiyet ve karmaşık geometrilerin üretimi açısından büyük avantajlar sunar. Malzeme çeşitliliği, baskı hızı ve çözünürlük gibi konularda sağlanan gelişmeler, bu yöntemin üretimdeki yerini giderek daha da güçlendirmiştir (Zakeri vd., 2020). SLA'nın en dikkat çekici özelliklerinden biri, fotopolimerler, kompozitler ve seramikler dahil olmak üzere geniş bir malzeme yelpazesinde üretim yapılabilmesidir. Özellikle karmaşık iç geometrilerin üretiminde, herhangi bir ek ekipmana ihtiyaç duymadan yüksek başarı sağlayan bu teknoloji, havacılık ve uzay gibi hafiflik, malzeme verimliliği ve tasarım esnekliğinin kritik olduğu sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Ramos vd., 2025).

Eklemeli imalat, karmaşık yapılar ve gözenekli geometrilerin üretimini mümkün kılarak malzeme teknolojisinde yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır. Bu kapsamda, kafes yapılar, tekrarlayan hücreli birimlerden oluşan gözenekli yapılar olarak tanımlanır. Yüksek

enerji emme kapasitesi ve hafiflik gibi avantajları sayesinde mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir (Malekan & Sigurjónsson, 2024).

SLA teknolojisi uzun süredir kullanılmakla birlikte, 3D kafes yapıların çekme, basma ve darbe performanslarına dair literatürde hâlâ bilgi eksiklikleri mevcuttur. Bu çalışma, söz konusu bilgi boşluğundan hareketle, Al_2O_3 , hBN ve SiC takviyeli reçineler kullanılarak SLA yöntemiyle üretilen basit kübik, elmas ve oktahedral kafes yapıların mekanik, termal ve mikroyapısal özelliklerini kapsamlı biçimde incelemeyi amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında:

- Kafes yapıların mikro yapıları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile,
- Mekanik özellikleri çekme ve basma testleri ile,
- Termal davranışları Termogravimetrik Analiz (TGA), Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Türev Termogravimetrik (DTG) analizleriyle,
- Enerji emilim kapasiteleri ise Charpy çentik darbe testleri ile değerlendirilmiştir.

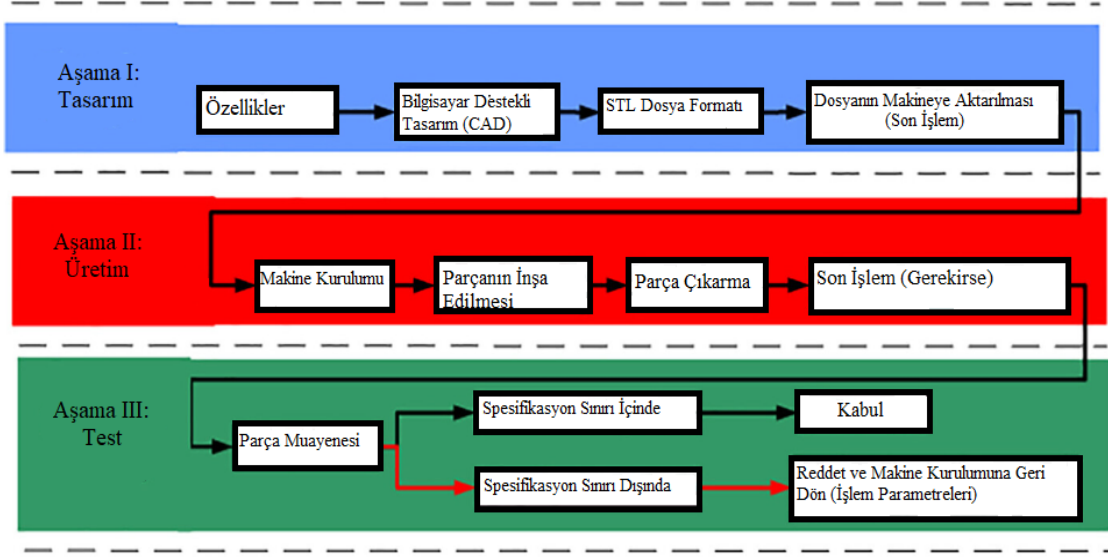
2. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)

Eklemeli imalat dijital bir modelden fiziksel bir parça üretebildiğimiz üretim tekniğidir. Katman katman malzeme biriktirerek parça üretme süreci olarak da tanımlanabilir. 3D baskı olarak da bilinen modern Eİ'nin 1980'li yılların ortalarına dayandığı bilinmektedir. 1986 yılında Charles Hull (Hull, 1986) "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography" isimli patenti almıştır. Bu patent bilgisayar kontrollü bir ışık demeti kullanılarak bir dizi kesitin foto-sertleştirilmesi sürecini açıklamaktadır. Hull ve Raymond Freed, 3D Systems Inc.'i kurdular. 1987 yılında Eİ'nin ilk ticari kullanımı bu firmanın geliştirdiği bir beta test sistemi olan SLA-1'dir. 3D Systems, SLA'yı ABD'de ticarileştirdikten sonra, Japonya'da NTT Data CMET şirketi 1988'de, Sony/D-MEC şirketi ise 1989'da stereolitografinin farklı versiyonlarını ticarileştirdiler. 1991 yılında Stratasys tarafından eriyik yığarak modelleme (FDM), Cubital tarafından Katı Zemin Kütleme (SGC) ve Helisys tarafından Lamine Nesne Üretimi (LOM) olmak üzere üç Eİ teknolojisini ticarileştirdiler (Wohlers vd., 2016). 1992 yılında Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi Deckard ve arkadaşları (Deckard vd., 1992) tarafından "Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning" adı ile patentlendi. 1993 yılında Soligen mürekkep püskürtme mekanizması kullanan Doğrudan Kabuk Üretim Dökümü (DSPC)'nü ticarileştirdi (Wohlers vd., 2016).

Tüm eklemeli imalat yöntemleri temel olarak benzer bir prensibe dayanır: Tasarlanan parçanın CAD dosyası önce iki boyutlu (2D) kesit katmanlarına dilimlenir; ardından, bu 2D kesitlere göre fiziksel model, katman katman üretilerek üç boyutlu (3D) parça oluşturulur. SLA yönteminde ise akrilatlar ve/veya epoksitler gibi fotopolimerize edilebilir monomerlerden oluşan fotokürlenebilir bir reçine, ardışık ince 2D katmanlar hâlinde lazer ışınına maruz bırakılır. Bu süreçte her bir sıvı katman, lazerle seçici olarak sertleştirilerek katı hâle gelir ve bu işlem 3D parça tamamen oluşana kadar katmanlar hâlinde tekrarlanır (Zakeri vd., 2020).

Eİ, sıvı reçineler veya tozlar gibi malzemelerin füzyon, bağlama ya da katılaştırma yoluyla birleştirilmesi esasına dayanan bir üretim tekniği olarak tanımlanabilir. Bu süreçte, CAD modelleri kullanılarak parçalar katman katman üç boyutlu (3D) olarak üretilir. Eİ süreçlerini tanımlamak için; üç boyutlu yazdırma (3DP), hızlı prototipleme (RP), doğrudan dijital üretim (DDM), hızlı üretim (RM) ve katı serbest form üretimi (SFF) gibi terimler de kullanılmaktadır. Malzeme hazırlığı, katman oluşturma yöntemi, faz dönüşüm mekanizması, kullanılan malzeme türü ve uygulama gereksinimlerine bağlı

olarak farklı Eİ süreçleri geliştirilmiştir. Genel olarak bir Eİ süreci, Şekil 2.1’de gösterildiği üzere; tasarım, üretim ve test olmak üzere üç temel aşamadan oluşur (Abdulhameed vd., 2019).



Şekil 2.1 Eİ sürecindeki aşamalar (Abdulhameed vd., 2019)

Şekil 2.1’de de gösterildiği üzere, eklemeli imalat süreci, üretilecek objenin üç boyutlu modellemesiyle başlar. Bu model, çeşitli bilgisayar destekli tasarım yazılımlarıyla oluşturulabileceği gibi; lazer, optik, manyetik rezonans (MR), bilgisayarlı tomografi (CT) veya fotoğraf tabanlı 3D tarama sistemleri aracılığıyla da elde edilebilir. Modelleme işleminin ardından, oluşturulan 3D modelin, dilimleme (slicing) yazılımı tarafından tanınabilir bir dosya formatına dönüştürülmesi gereklidir. Eklemeli imalat süreçlerinde en yaygın kullanılan dosya formatı STL (Stereolithography) formatıdır. Model uygun formata çevrildikten sonra bir dilimleyici yazılıma aktarılır. Bu yazılım, modeli belirlenen katman kalınlığına göre dilimleyerek, 3D yazıcının parçayı üretmesi için gerekli olan G-kodlarını üretir. Elde edilen G-kodları çıkarılabilir bellek aygıtı veya kablolu/kablosuz bağlantılar aracılığıyla 3D yazıcıya aktarılır. Dosya aktarımının tamamlanmasının ardından yazıcı, üretim işlemine başlar.

Geleneksel üretim tekniklerine kıyasla 3D üretim sistemlerinin benimsenmesine yönelik artan eğilim, bu teknolojilerin sunduğu çeşitli avantajlara dayanmaktadır. Bu avantajlar arasında; yüksek hassasiyetle karmaşık geometrilerin üretilebilmesi, maksimum düzeyde malzeme tasarrufu sağlanması, tasarım esnekliğinin artırılması ve kişiselleştirilmiş üretim olanaklarının sunulması yer almaktadır (Ngo vd., 2018). Ancak tüm bu avantajlara rağmen, Eİ sistemleri, CNC tezgâhlarıyla karşılaştırıldığında nispeten düşük doğruluk

düzeyleri ve uzun üretim süreleri gibi bazı sınırlamalar barındırmaktadır (Abdulhameed vd., 2019). Günümüzde Eİ teknolojileri; havacılık, otomotiv, biyomedikal ve tıp gibi birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de eklemeli imalat yöntemlerinin genel bir özeti sunulmaktadır.

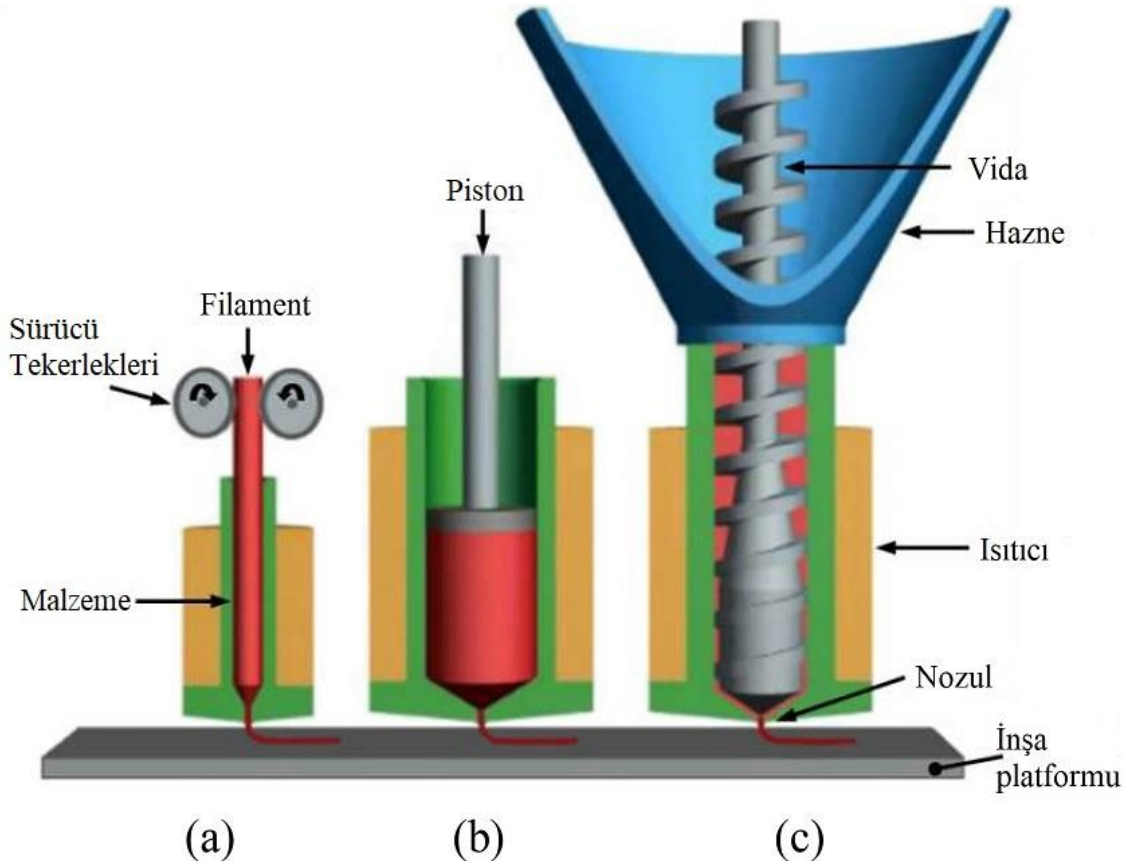
Eklemeli İmalat İşlemleri									
İşlem	Lazer Tabanlı Eklemeli İmalat Süreçleri			Termal Ekstrüzyon	Malzeme Püskürtme	Malzeme Yapışması	Elektron Demeti		
	Lazer Eritleme		Lazer Polimerizasyonu						
Süreç Şeması									
İsim	Malzeme	SLS	DMD	SLA	FDM	3DP	LOM	EBM	
		SLS	LENS	SGC	Robocasting	IJP	SFP		
		DMLS	SLC	LTP		MJM			
			LPD	BIS		BPM			
				HIS		Thermojet			
Dökme Malzeme Türü		Toz	Sıvı	Katı					

Şekil 2.2 Eİ yöntemlerinin özeti (Yalçın vd., 2019)

2.1. Malzeme Ekstrüzyon Yöntemi (ME)

Malzeme Ekstrüzyonu (ME), Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından sınıflandırılan eklemeli imalat (Eİ) tekniklerinden biridir. Bu yöntemin en yaygın uygulamaları arasında Eriyik Yığarak Modelleme (FDM) ve Erimiş Filament Üretimi (FFF) yer almakta olup, bu tekniklerde termoplastik bir filament, ısıtılmış bir nozul aracılığıyla eritilerek katman katman biriktirilir (Zhuo vd., 2021). ME tabanlı katkılı imalat, özellikle geleneksel üretim yöntemleriyle işlenmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık yapıların üretiminde önemli bir maliyet ve zaman avantajı sunmaktadır (Braconnier vd., 2020). Ayrıca, bu teknoloji; polimerler, metaller, biyomalzemeler, gıda ürünleri, seramikler ve kompozitler gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı ve malzeme uyumluluğu sunarak, en çok yönlü katkılı imalat yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Sun vd., 2023). Bununla birlikte, ekstrüzyon tabanlı Eİ süreçleri, bazı malzeme ve proses kısıtlamaları nedeniyle özellikle metal ve cam gibi özel malzemelerin

işlenmesinde sınırlı kalabilmektedir. Malzeme biriktirme mekanizmasına göre ekstrüzyon bazlı Eİ teknikleri; filament, piston ve vida tabanlı sistemler olmak üzere üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Şekil 2.3'te bu ekstrüzyon sistemlerinin temel bileşenleri gösterilmektedir (Altıparmak & Daminabo, 2024).



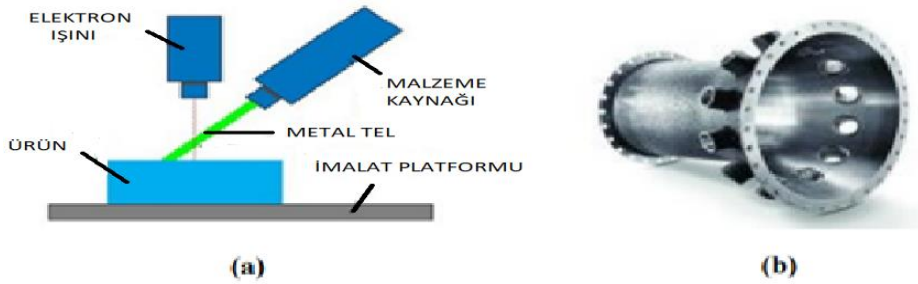
Şekil 2.3 Ekstrüzyon tabanlı Eİ proses tiplerinin ana bileşenleri: (a) Filament tabanlı; (b) Piston tabanlı; (c) Vida tabanlı ekstrüzyon (Altıparmak & Daminabo, 2024)

2.2. Doğrudan Enerji Depolama (DED)

Doğrudan Enerji Depolama (DED) işlemi, ISO/ASTM 52900 standardına göre, “odaklanmış termal enerjinin, malzemelerin biriktirilirken eritilerek birleştirilmesi amacıyla kullanıldığı bir eklemeli imalat süreci” olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, kaplama ve kaynak teknolojilerinin temel prensiplerini esas alır (Ahn, 2021). DED işlemi; paslanmaz çelikler, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, titanyum ve kobalt bazlı alaşımlar, nikel ve alüminyum alaşımları, yüksek entropili alaşımlar, intermetalik bileşikler, şekil hafızalı alaşımlar, seramikler, kompozitler ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler gibi yüksek performanslı malzemelerin üretimi için son derece uygun bir teknolojidir.

DED sürecinde, alt tabakaya odaklanan yüksek enerji yoğunluklu bir ısı kaynağı (lazer, elektron ışını veya plazma/elektrik arkı), küçük bir eriyik havuzu oluşturur ve aynı anda bu havuza toz ya da tel formunda hammadde beslenerek katmanlı yapı meydana getirilir (Svetlizky vd., 2021). Başlangıçta bir kaplama tekniği olarak geliştirilen DED, günümüzde karmaşık geometrilere sahip net şekle yakın parçaların üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemi hâline gelmiştir. Son on yılda, özellikle yüksek maliyetli malzemelerde tasarruf sağlaması ve karmaşık yapılar üretebilme kabiliyeti sayesinde DED'e olan ilgi artmıştır.

Diğer eklemeli imalat yöntemleriyle kıyaslandığında, DED; monolitik metal yapılar ile işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimi ve onarımı açısından benzersiz avantajlara sahiptir (Saboori vd., 2019). Şekil 2.4'te DED üretim sürecinin şematik görünümü ile bu yöntemle üretilmiş bir örnek parça sunulmaktadır.

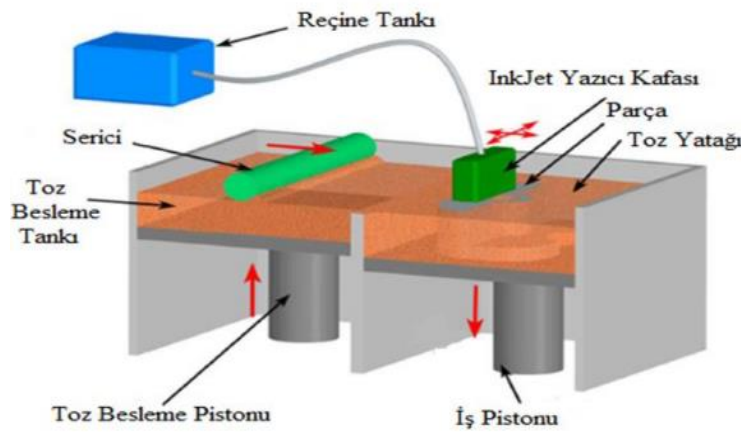


Şekil 2.4 (a) DED imalat yönteminin şematik görünüşü, (b) Ürün (Yalçın & Ergene, 2017)

2.3. Bağlayıcı Püskürtme (BJ) Yöntemi

Bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting, BJ) teknolojisi, 1990'lı yılların başında Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, toz halindeki malzemelerin bir katman boyunca serilmesinin ardından, seçici olarak bir bağlayıcının püskürtülmesi ile parçaların oluşturulmasına dayanır. İşlem, toz yatağına katman katman bağlayıcı uygulanması prensibiyle çalışır ve üretim tamamlandığında üç boyutlu bir yapı ortaya çıkar (Mirzababaei & Pasebani, 2019). BJ yöntemi yedi ana adımdan oluşmaktadır: baskı, kütleme, tozdan arındırma, sinterleme, infiltrasyon, tavlama ve son işlem. Süreç, genellikle silindirik bir serici aracılığıyla toz malzemenin üretim plakası üzerine serilmesiyle başlar. Ardından, dijital modele uygun olarak bağlayıcı seçici bir şekilde püskürtülür. Her baskı döngüsünde üretim plakası belirli bir katman kalınlığı kadar aşağıya iner ve yeni bir toz tabakası serilir. Bu adımlar, parçanın

tamamı üretilene kadar tekrarlanır (Bardakçı vd., 2022). BJ yönteminin önemli avantajlarından biri, kullanılan malzemenin toz formunda olması nedeniyle destek yapılarına ihtiyaç duyulmamasıdır. Ayrıca bu yöntem, neredeyse her türden toz haline getirilebilen malzemeyle üretim yapılmasına olanak tanır (Saltık & Özsoy, 2021). Enerji açısından değerlendirildiğinde, BJ en düşük enerji girişine sahip 3D baskı yöntemlerinden biri olarak öne çıkar. Bu da daha düşük termal kalıntı gerilimleri, daha yüksek üretim verimliliği ve tozların geri dönüştürülebilirliği gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenlerle, BJ teknolojisinin gelecekte daha da geliştirilme potansiyeli oldukça yüksektir (Zhao vd., 2023). Şekil 2.5'te bağlayıcı püskürtme yönteminin şematik diyagramı verilmiştir.

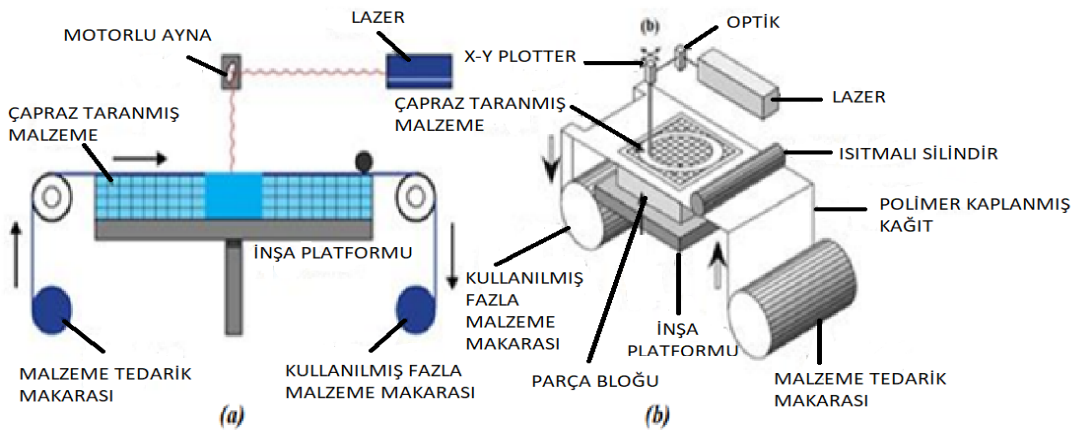


2.4. Levha/Sac Laminasyonu

Levha Laminasyonu yöntemlerinden biri olan Lamine Nesne Üretimi (Laminated Object Manufacturing, LOM), eklemeli ve çıkarmalı imalat süreçlerini bir araya getirir. Bu yöntemde malzeme, levha formunda beslenir ve katmanlar arasında ısı, basınç ve termal

yapıştırıcı uygulanarak birbirine bağlanır. Daha sonra, bir karbondioksit (CO₂) lazeri kullanılarak her katman, CAD ve STL dosyalarından elde edilen model bilgilerine göre kesilir (Wong & Hernandez, 2012). LOM'un avantajları arasında yüksek yüzey kalitesi, düşük malzeme gereksinimi, az sayıda ekipman ihtiyacı ve nispeten düşük maliyetle yüksek mukavemetli yapıların üretilmesi yer almaktadır (Abdulhameed vd., 2019). Şekil 2.6'da LOM yönteminin şematik görünümü verilmiştir.

Bu sınıfta yer alan bir diğer yöntem ise Ultrasonik Katkı İmalatı'dır (Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM). Daha önce "ultrasonik konsolidasyon" (Ultrasonic Consolidation, UC) olarak adlandırılan bu yöntem, ince metal folyo tabakalarının birleştirilmesi amacıyla ultrasonik dikiş kaynağı prensibini kullanır. Bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) işleme ve gerekli durumlarda gömülü elemanların entegrasyonu ile birleşerek karmaşık, içi boş veya fonksiyonel yapıların üretimi mümkün hâle gelir (D. Li, 2021). UAM, katı hal bir Eİ süreci olması nedeniyle birçok avantaja sahiptir. Diğer pek çok Eİ yönteminde görülen malzeme faz dönüşüm gereksinimi, kullanılabilecek malzeme yelpazesini sınırlandırırken; UAM, düşük ısı girdisi ve hızlı ısı dağılımı sayesinde daha geniş bir malzeme yelpazesinin işlenmesini mümkün kılar. Ayrıca UAM, diğer Eİ tekniklerine kıyasla biriktirilen hacim başına daha yüksek bir üretim hızına sahiptir. İç kanallar, boşluklar gibi kompleks iç geometrilere sahip yapılar UAM kullanılarak üretilir. Bu yöntemin bir diğer önemli avantajı ise üretim sürecinin ara verilerek durdurulabilmesi ve bu esnada parça üzerinde işleme işlemlerinin uygulanabilmesidir. Bu özellik, diğer üretim teknolojilerinde oldukça sınırlı veya mümkün olmayan bir esneklik sunmaktadır (Gujba & Medraj, 2020).



Şekil 2.6 LOM yönteminin şematik gösterimi (a) İki boyutlu görünüm (b) Perspektif görünümü (Karagöz vd., 2021)

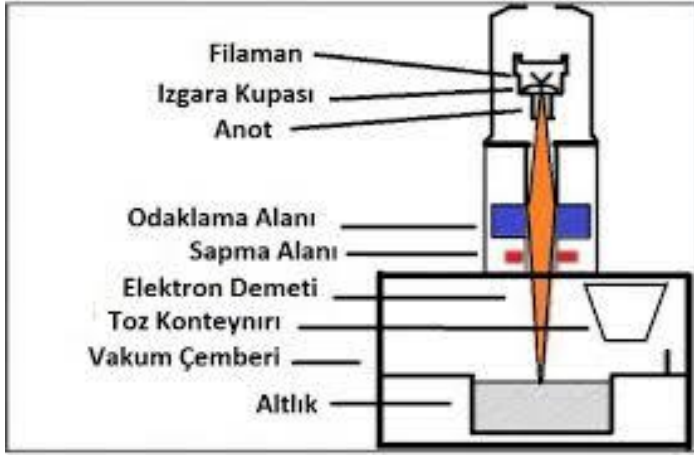
2.5. Toz Yataklı Ergitme (PBF)

Toz Yataklı Ergitme (Powder Bed Fusion, PBF), üretim teknolojileri, mühendislik ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, Eİ süreçleri arasında en ileri tekniklerden biri olarak öne çıkmaktadır (Dzogbewu & de Beer, 2023). PBF, ince toz halindeki malzemenin bir yayıcı vasıtasıyla yapı platformuna katman katman serildiği ve ardından lazer, elektron ışını veya ısıtılmış bir baskı kafası gibi bir ısı kaynağı yardımıyla belirli bölgelerde eritilerek birleştirildiği bir teknolojidir. Her katmanın işlenmesinin ardından yapı platformu bir miktar aşağı iner ve yeni toz katmanı yayılarak işlem üç boyutlu parça tamamlanıncaya kadar tekrarlanır (Mehrpouya vd., 2022). PBF teknolojisinin dört ana varyasyonu bulunmaktadır: Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS), Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting, SLM), Elektron Işını ile Ergitme (Electron Beam Melting, EBM) ve Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering, DMLS). Bu yöntemler arasında özellikle SLM, yüksek yoğunluklu lazer kullanarak metalik tozları tamamen eriten ve yoğun, ince mikro yapıya sahip parçalar üreten bir yöntem olarak dikkat çekmektedir (Jia vd., 2021). SLM süreci, CAD verileri doğrultusunda, seçilen bölgelerdeki tozları katman katman eriterek metal bileşenler elde eder (C. Y. Yap vd., 2015). Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla SLM, kalıba ihtiyaç duymadan doğrudan üretim yapılmasını mümkün kıldığı için özellikle karmaşık parça üretiminde önemli avantajlar sunmaktadır (Gao vd., 2022).

SLS ve SLM süreçleri arasındaki temel fark, tozun tamamen eriyip erimemesidir. SLS işleminde toz, bağlayıcı malzeme ile birlikte kısmen eritilerek bir araya getirilirken, SLM’de metal tozları tamamen eritilerek tek bileşenli, tam yoğunluklu parçalar elde edilir. DMLS de SLS’ye benzer şekilde sinterleme esasına dayanan bir yöntem olup, tozlar tam olarak eritilmeden yüksek sıcaklıkta birbirine bağlanacak şekilde işlenir (Jia vd., 2021). PBF yöntemleriyle destek yapılarına veya kalıplara ihtiyaç duyulmadan karmaşık geometrilere sahip polimer ve kompozit parçalar üretilebilmekte, bu da yöntemleri prototip üretiminden otomotiv ve havacılık sektörlerindeki yedek parça üretimine ve kişiye özel biyomedikal protez tasarımlarına kadar geniş bir uygulama alanında cazip hâle getirmektedir (Lupone vd., 2021). Özellikle DMLS, yüksek mukavemetli parçalar üretmenin yanı sıra hızlı üretim süresi ve malzeme israfının azlığı ile öne çıkarken; yüksek enerji tüketimi ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği gibi bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir (Sürmen, 2019). Şekil 2.7’de SLM/SLS

Elektron ışını ile ergitme (EBM) işlemi, havacılık ve tıbbi uygulamalar için yüksek performanslı malzemelerden yapılmış karmaşık metalik bileşenler üretmek için büyük ölçüde kullanılan bir katkı maddesi üretim işlemidir (Del Guercio vd., 2020). EBM yönteminde, vakum odasında yoğunlaştırılmış bir elektron ışını kullanılarak, filament veya metal tozu eritilir ve daha sonra kullanılır. Elektromanyetik bobinler doğru ve hızlı ışın kontrolü sağlar. Bu ışın kontrolü, elektron ışınını yöneten birkaç eriyik havuzunu aynı anda muhafaza etme olanağı verir. Vakum odasındaki üretim süreci, oksidasyonun titanyum gibi yüksek reaktif malzemeleri tehlikeye atmamasını sağlar. Bu arada, gaz molekülleriyle herhangi bir çarpışmayı önlemek için vakum odasında üretim yapmak gerekir. Böyle bir durumda üretim yapmak, sağlam, yüksek kaliteli metal yapıların oluşumunu sağlar (Kolamroudi vd., 2021). EBM, özellikle mükemmel kaliteli malzemeden yapılmış karmaşık parçalar olmak üzere tam yoğunluklu işlevsel parçalar üretebilen birkaç Eİ işleminden biridir. EBM işlemi, paslanmaz çelik (17-4), takım çeliği (H13), Ni bazlı süper alaşımlar (625 ve 718), Co bazlı süper alaşımlar (Stellite 21), düşük genleşmeli alaşımlar (Invar), sert metaller (NiWC), intermetalik bileşikler, alüminyum, bakır, berilyum ve niyobyum gibi birçok farklı malzeme sınıfıyla çalışmak için

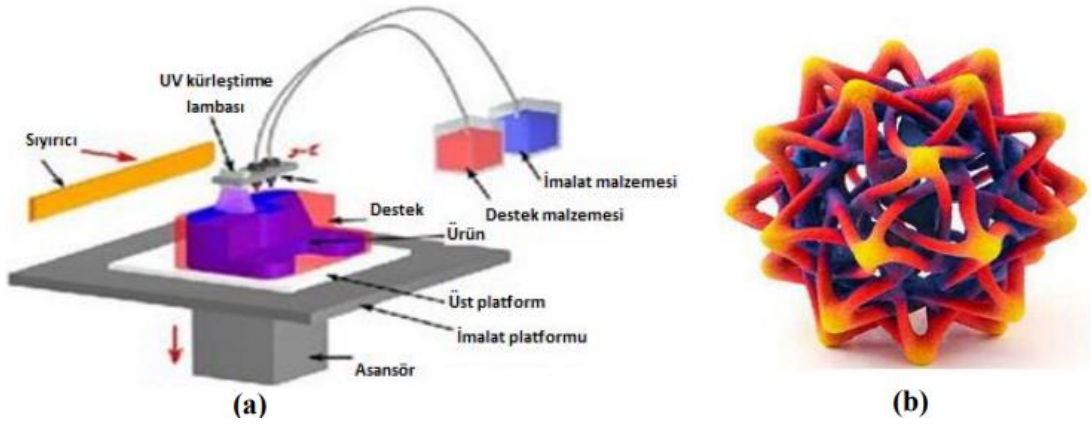
kullanılabilir (Galati & Iuliano, 2018). Şekil 2.8’de EBM yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.8 EBM yönteminin şematik gösterimi (Gök vd., 2023)

2.6. Malzeme Püskürtme (MJ)

Malzeme Püskürtme (Material Jetting, MJ) yöntemi, fotopolimer malzemelerin çok ince tabakalar halinde biriktirilerek üç boyutlu nesnelerin üretildiği bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu yöntemde, fotopolimer malzemeleri, hava geçirmez tanklar içinde depolanır. Tanklardan, fotopolimerin nozula iletildiği iletim hattına ulaşan malzeme, burada ısıtıldıktan sonra damlacıklar halinde yapı platformu üzerinde biriktirilir. Platform üzerinde biriken malzeme, ultraviyole (UV) ışık ile kürlenir. UV ışık kaynağı, belirli bir dalga boyunda ışık yayarak sıvı haldeki monomerleri veya oligomerleri sertleştirir. Bu fotopolimerizasyon veya foto-kürleme süreci, malzemenin katılaşmasını sağlar (Gülcan vd., 2021). MJ, özellikle maliyet etkinliği, yüksek verimlilik ve üretim ölçeklenebilirliği açısından öne çıkan bir yöntemdir. Ayrıca, çoklu malzeme baskı kapasitesi sayesinde işlevsellik açısından önemli avantajlar sunar ve bu nedenle çok çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalar için tercih edilmektedir (Elkaseer vd., 2022). Diğer katkılı üretim yöntemlerine kıyasla MJ'nin bir avantajı, baskının yüzey eğimi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azalmasıdır. Bu özellik, diğer eklemeli imalat işlemlerinde genellikle gözlemlenmez (Tyagi vd., 2022). Şekil 2.9’da malzeme püskürtme yöntemi şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9 (a) Malzeme püskürtme yönteminin şematik görünüşü, (b) Ürün (Yalçın & Ergene, 2017)

2.7. Fotopolimerizasyon Yöntemi

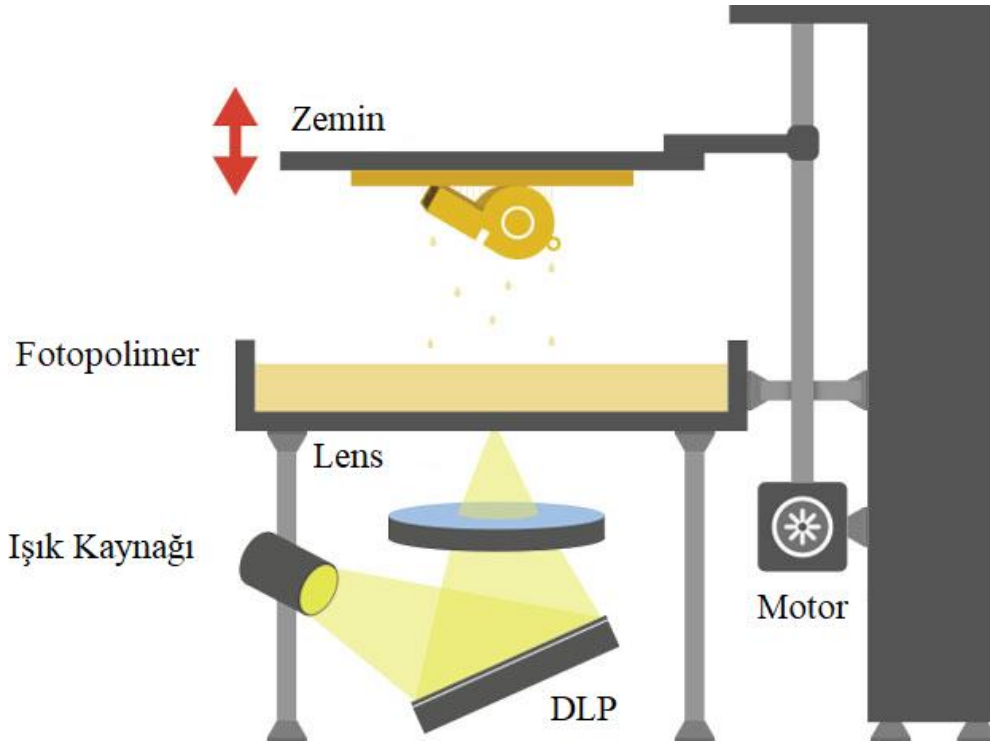
3D fotopolimerizasyonun (fotokürleme veya foto-çapraz bağlama olarak da bilinir) ardındaki strateji, belirli dalga boyundaki ışık kaynağına maruz kaldığında kürlenebilen/fotopolimerize olabilen ve termosetler oluşturabilen sıvı haldeki monomer/oligomerlerin kullanılmasına dayanır (Bagheri & Jin, 2019). Kimyasal işleme dayalı bir 3D baskı tekniği olarak, kuvvet fotopolimerizasyonu esnek malzeme tasarımı, yüksek baskı çözünürlüğü, hızlı baskı ve pürüzsüz baskı yüzeyi gibi dikkate değer avantajlara sahiptir. En yaygın kullanılan kuvvet fotopolimerizasyon yöntemleri stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP) ve sürekli sıvı arayüz üretimi (CLIP) yöntemleridir (Bao, 2022).

2.7.1. Dijital Işık İşleme (DLP)

Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing, DLP), yüksek boyutsal kararlılığa sahip üç boyutlu polimerik bileşenlerin üretiminde kullanılan hassas bir eklemeli imalat yöntemidir (Brighenti vd., 2023). Bu yöntemde, oluşturulan CAD modeli dilimleme yazılımı kullanılarak katmanlara ayrılır ve her bir katmanın dijital görüntüsü elde edilir. Daha sonra, belirli bir dalga boyundaki ışık kaynağı ve DLP projektörü yardımıyla bu kesit görüntüsü, fotokürlenebilir reçinenin yüzeyine yansıtılır. Reçinenin yüzeyine her seferinde bir katman görüntüsü projeksiyonla aktarılır ve bu işlem sonucunda, ışığın tetiklediği fotokimyasal reaksiyonla reçinenin ince bir tabakası katılarak kürlenir (Mamatha vd., 2023).

DLP sürecinde kullanılan fotokürlenebilir reçineler genellikle oligomerler, aktif monomerler, fotobaşlatıcılar (PI'ler) ve az miktarda katkı maddelerinden oluşur (J. Li vd.,

2022). Bu yöntem, yüksek baskı hızı ve ince ayrıntılara sahip parçaların üretilmesiyle öne çıkar. Son yıllarda DLP teknolojisinde yaşanan gelişmeler, mekanik ve termal özellikleri geliştirilen yeni reçine formülasyonlarının ortaya çıkmasını sağlamış; böylece bu yöntemin daha zorlu ve fonksiyonel uygulama alanlarında kullanılmasının önü açılmıştır (L. Zhou vd., 2024). Şekil 2.10’da DLP yönteminin çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.10 DLP yönteminin şematik gösterimi (Sürmen, 2019)

2.7.2. Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP)

Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Digital Light Processing, CDLP) teknolojisi, çalışma prensibi bakımından DLP’ye benzemekle birlikte, önemli yapısal farklılıklar içermektedir. CDLP’de baskı sırasında yapı platformu, Z ekseninde adım adım hareket etmek yerine sürekli bir şekilde yukarı doğru hareket eder (Maranha vd., 2023). Ayrıca, DLP yönteminde her katman, reçine yüzeyine dijital projektörle yansıtılan 2D görüntüler aracılığıyla kürlenirken; CDLP teknolojisinde reçine, hareketli ve sürekli bir ışık kaynağı yardımıyla kesintisiz olarak kürlenir (M. Singh & Jonnalagadda, 2020).

Bu sürekli kürlenme mekanizması sayesinde CDLP, DLP’ye kıyasla daha yüksek verimlilik ve daha hızlı üretim imkânı sunmaktadır. CDLP teknolojisi, ilk olarak Amerikalı üretici *EnvisionTEC* tarafından geliştirilmiştir (Dubey vd., 2024). CDLP ile Stereolitografi (SLA) teknolojisi arasında da bazı temel farklar bulunmaktadır. SLA

yönteminde yapı platformu reçinenin içine doğru hareket ederken, CDLP sisteminde yapı platformu reçine içerisinden yukarı doğru çekilir. Ayrıca CDLP, kullanıcıya baskı sırasında kürlendirme seviyesini ayarlama imkânı tanıyarak süreç üzerinde daha fazla kontrol sağlamaktadır (Dean vd., 2012). Bu teknolojinin en önemli avantajlarından biri, farklı malzeme türleriyle çalışabilme esnekliğidir. CDLP ile yumuşak elastomerik polimerler, seramik bazlı reçineler ve biyolojik olarak uyumlu malzemeler gibi çeşitli malzeme türlerinin kullanımı mümkündür (Sürmen, 2019).

2.7.3. Stereolitografi (SLA)

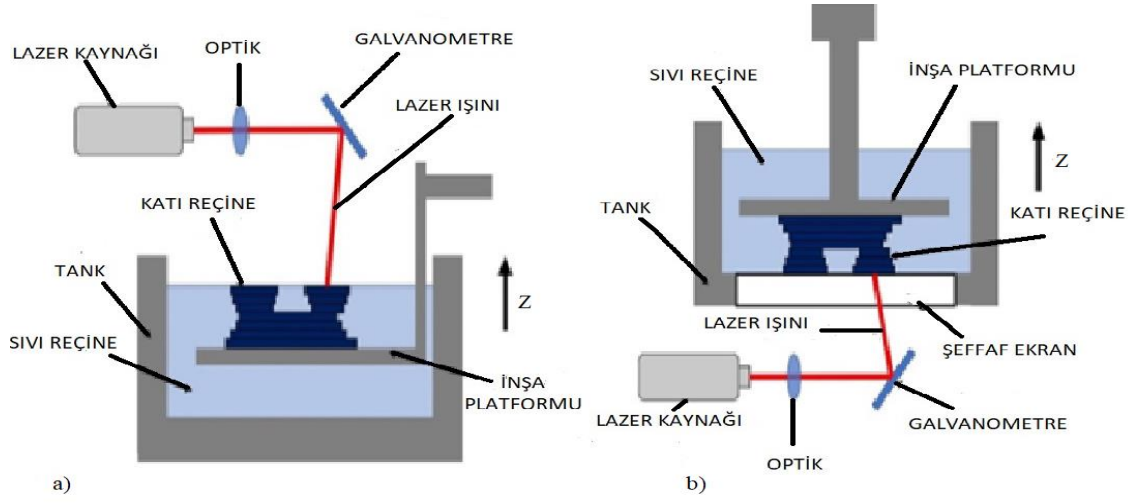
Modern stereolitografi ile ilişkili ilk önemli çalışmalar 1970'li yıllara dayanmaktadır. Swainson (Swainson, 1977), ki kesişen radyasyon ışını yardımıyla polimerlerin fotokimyasal olarak çapraz bağlanması veya bozunması yoluyla üç boyutlu nesnelerin üretilebileceği bir sistem için patent başvurusunda bulunmuştur. Daha sonra Herbert (Herbert, 1982) ışığa duyarlı polimerleri katman katman katılaştırarak nesne üretimini mümkün kılan bir sistemi tanıtmıştır. Bununla birlikte, çoğu araştırmacı modern stereolitografinin gelişiminin Charles Hull'un (Hull, 1986) çalışmalarıyla başladığı konusunda hemfikirdir Hull (Hull, 1986)'un çalışmalarıyla başladığı konusunda hemfikir olmuştur (Huang vd., 2020).

SLA, CAD dosyasına dayalı olarak nesnelerin üretildiği katkı maddeli üretim (Eİ) yöntemlerinden biridir. Üretilen parçanın dış ve iç (örneğin gözenekli yapı) geometrisi; CAD yazılımlarıyla modellenir, matematiksel denklemlerle tanımlanabilir veya manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve bilgisayarlı tomografi gibi klinik görüntüleme tekniklerinden elde edilen verilerle oluşturulabilir (Melchels vd., 2010). SLA sürecinde, sıvı halindeki fotoreaktif reçineler, belirli dalga boyundaki ışık kaynakları aracılığıyla seçici olarak kürlenerek katı hâle getirilir. Bu fotopolimerizasyon süreci sırasında, ışığa maruz kalan reçinelerdeki kısa zincirli monomer ve oligomer yapılar, sert veya esnek polimer zincirlerine dönüşerek üç boyutlu nesneleri oluşturur. Bu işlem sonunda elde edilen yarı kürlenmiş nesneler “yeşil parçalar” olarak adlandırılır ve son olarak, mekanik ve yüzey özelliklerini tamamlamak amacıyla ikincil bir UV kürlendirme döngüsüne tabi tutulur (Bove vd., 2022). Stereolitografi sistemleri, Z ekseninde hareket yönüne göre iki temel mimariye ayrılır: yukarıdan aşağıya yapılandırma yapı platformu negatif Z yönünde, yani yerçekimi doğrultusunda hareket ederken; aşağıdan yukarıya yapılandırma ise platform pozitif Z yönünde, yani yerçekiminin tersine hareket eder

(Mele vd., 2020). Bu iki yapılandırmanın avantajları ve dezavantajları Tablo 2.1'de özetlenmiş, Şekil 2.11'de ise yöntem şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Stereolitografinin iki ana mimarisinin avantaj ve dezavantajları (Mele vd., 2020)

	Yukarıdan aşağıya	Aşağıdan yukarıya
Avantajları	1-Her katman basıldıktan sonra baskının yapı plakasından ayrılmasına gerek olmadığından daha hızlı bir baskı süreci	1-Parça küvetten çıkarıldığında az reçine gerektirir, bu da makinelerin daha küçük olabileceği anlamına gelir
	2-Parçadaki kuvvetler çok daha düşüktür	2-Her katmanın kalınlığını kontrol etmek kolaydır
	3-Parçaların açılı olarak basılmasına gerek olmadığından daha az destek malzemesine ihtiyaç duyulur	
	4- Yazıcılar genellikle daha güvenilir kabul edilir	
Dezavantajları	1-Daha fazla reçineye ihtiyaç duyulduğundan makineler çok daha büyüktür	1-Optimum baskı koşullarını korumak için reçine haznesinin/penceresinin düzenli olarak değiştirilmesi gerekir
	2-Yüzey ile parçanın üstü arasındaki yükselen kalınlığı sürekli olarak kontrol edilmelidir	2-Kademe ve yer çekiminden (parçanın ağırlığı) kaynaklanan kuvvetler nedeniyle baskı başarısızlığı olasılığının artması
	3-Reçineyi değiştirmek zordur ve reçine tanklarını değiştirmek pahalıdır	3-Parçaların açılı olarak basılması gerekir, bu da yapım süresini ve maliyetini artırır



Şekil 2.11 a) SLA'nın yukarıdan aşağıya ve b) aşağıdan yukarıya mimarileri (Mele vd., 2020)

3. KAFES YAPILARI

Kafes yapılar, ardışık ve tekrarlı şekilde düzenlenmiş, üç boyutlu uzayda birbirine bağlı destek ve düğümlerden oluşan hücresel sistemler olarak tanımlanabilir. Bu tür yapılar, düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve sertlik, enerji sönümleme kapasitesi ve titreşim azaltma gibi çok sayıda avantajlı özelliğe sahiptir. Bu özellikler sayesinde, kafes yapılar havacılık, biyomedikal mühendislik, otomotiv ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir (Arslanca, 2024). Günümüzde, enerji verimliliğine yönelik artan küresel talepler, özellikle hafif yapı elemanlarına duyulan ihtiyacı artırmıştır. Örneğin, havacılık ve uzay endüstrisinde parça ağırlığındaki azalma, yakıt tüketimini ve operasyonel maliyetleri doğrudan azaltmaktadır. Otomotiv sektöründe ise, araç bileşenlerinin ağırlığında %10'luk bir azalma, yakıt tüketiminde yaklaşık %6-8 oranında iyileşme sağlayabilmektedir. Bu hedefler doğrultusunda, kafes yapılar oldukça etkin çözümler sunmaktadır (Nagesha vd., 2020).

Kafes yapıların mekanik davranışları üzerinde birim hücre tasarımı belirleyici bir role sahiptir (Echeta vd., 2020).

Hücre topolojisi (bağlantı düzeni), hücre boyutu ve destek çapı gibi geometrik parametreler, bu yapıların akustik, dielektrik ve mekanik performanslarını büyük ölçüde etkileyebilir. Bu sayede, kafes yapılar baz malzemelerin doğal sınırlarının ötesinde performans sergileyebilecek şekilde özelleştirilebilir.

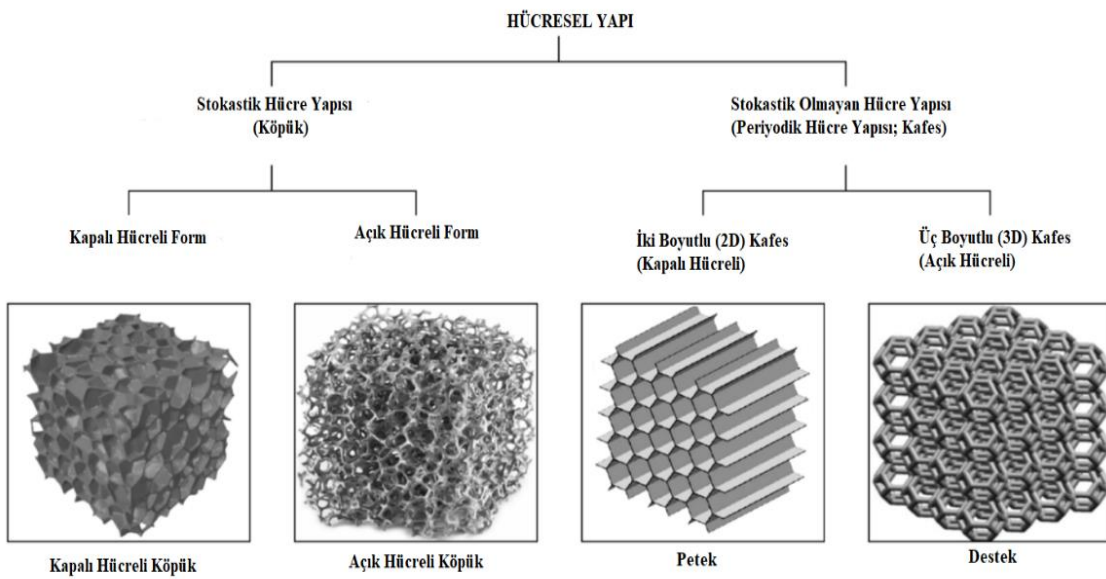
Özellikle Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemleriyle üretilen kafes yapılar, eşdeğer gözenekliliğe sahip konvansiyonel yöntemlerle elde edilen hücresel yapılara kıyasla daha üstün mekanik ve fiziksel özellikler sunmaktadır. Bu üstünlük, Eİ teknolojisinin sunduğu yüksek geometrik kontrol kabiliyeti ve üretim öngörülebilirliğinden kaynaklanmaktadır (Maconachie vd., 2019).

Katmanlı üretim teknolojilerinde son yıllarda yaşanan gelişmeler, kafes yapıların aşağıda belirtilen dört temel hedef doğrultusunda kullanılmasını mümkün kılmıştır (Helou & Kara, 2018):

- Üretim sürecinde kullanılan malzeme miktarının azaltılması,
- Üretim süresinin kısaltılması,
- Enerji tüketiminin düşürülmesi,
- Ağırlığın en aza indirilirken yapısal performansın optimize edilmesi.

3.1. Kafes Yapı Çeşitleri

Kafes yapılar, topolojik yapılarına göre genel olarak stokastik ve periyodik olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Stokastik kafes yapılar, hücre boyutları, şekil dağılımları ve bağlantı konumlarının rastgele bir olasılık dağılımına göre belirlendiği düzensiz yapılardır. Bu tür yapılar, istatistiksel yöntemlerle analiz edilebilir ve ortalama özellikleri tahmin edilebilir olsa da birebir yeniden üretimleri mümkün değildir ve deterministik bir yapı sergilemezler (Helou & Kara, 2018). Buna karşılık, periyodik kafes yapılar, belirli bir düzen içinde tekrarlanan birim hücrelere sahip sistematik yapılardır. Bu yapılarda hücre geometrisi, açıları, boyutları ve konumları önceden tanımlıdır ve yapı belirli bir desen üzerinden oluşturulur. Gyroid, octet truss ve diğer Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) türleri, periyodik kafes mimarisine örnek teşkil etmektedir (Borikar vd., 2023). Bu yapılar, kontrollü mekanik özellikler sağlamak ve üretilebilirliği artırmak amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 3.1’de, kafes yapıların bu temel sınıflandırmasına dair görsel bir özet sunulmaktadır.



Şekil 3.1 Kafes yapısının sınıflandırılması (Borikar vd., 2023)

3.1.1. Dikme Tabanlı Kafes Yapıları

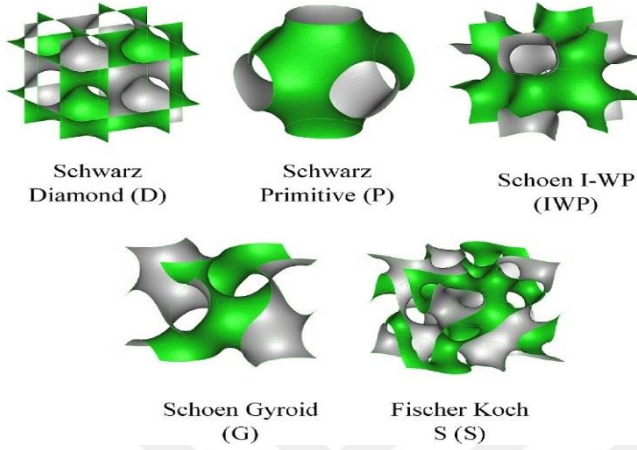
Dikme tabanlı kafes yapılar, düğüm noktaları arasında uzanan silindirik ya da prizmatik destek elemanlarından (dikmelerden) oluşan ve üç boyutlu bir ağ yapısı sergileyen birim hücrelerin tekrarlanmasıyla elde edilen düzenli yapılardır. Bu yapıların temel karakteristiği, belirli bir uzaysal yönde periyodik olarak yinelenen geometrik düzen ve

buna bağılı olarak ortaya çıkan mekanik davranıştır. Söz konusu hücre yapıları, yük taşıma, enerji absorpsiyonu ve dayanım-ağırlık oranı açısından oldukça optimize edilebilir özellikler sunar (Echeta vd., 2021). Dikme tabanlı kafes yapıların en yaygın örnekleri arasında gövde merkezli kübik (BCC) ve yüzey merkezli kübik (FCC) topolojiler yer alır. Bu yapılar, özellikle imalat kolaylığı, mekanik dayanım avantajı ve öngörülebilir davranışları nedeniyle kapsamlı biçimde araştırılmaktadır. Literatürde ayrıca, sekizli kafes yapısı, elmas tipi yapı ve kübik destekli topolojiler gibi ek geometrik varyasyonlar da sıklıkla tercih edilmektedir. Bu alternatif topolojiler hem mekanik performansın hem de üretim sürecinin optimize edilmesine olanak sağlamaktadır (Korkmaz vd., 2022). Öte yandan, dikme tabanlı yapılardan farklı olarak, yüzey tabanlı birim hücreler, matematiksel olarak bir fonksiyonun sabit değerine karşılık gelen izoyüzeyler (isosurfaces) şeklinde tanımlanır. Bu tür yapılar, genellikle sürekli eğrisel yüzeyler sergileyerek daha karmaşık ve organik geometri elde edilmesini mümkün kılar (Echeta vd., 2021).

3.1.2. Üçlü Periyodik Minimum Yüzey Kafes Yapıları (TPMS)

Doğada gözlemlenen topolojik yapılardan ilham alınarak geliştirilen mimari malzeme tasarımları, son yıllarda özellikle mühendislik uygulamalarında önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu bağlamda, Üçlü Periyodik Minimum Yüzeyler (Triply Periodic Minimal Surfaces – TPMS) temel alınarak geliştirilen kafes yapılar, mekanik performans, enerji sönümleme ve özgül mukavemet gibi açılardan oldukça etkileyici özellikler sunmaktadır (Viet vd., 2022). TPMS yapıları, üç uzaysal yönde periyodik olarak tekrarlanan, kendini kesmeyen ve sıfır ortalama eğrilik değerine sahip sürekli yüzeylerdir. Bu geometrik özellik, geleneksel dikme tabanlı kafes yapılara kıyasla daha düzgün gerilim dağılımı ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi sağlar. Ayrıca, TPMS yapıların eşit dağılımlı ve kesintisiz yüzey morfolojisi, yapısal dayanım ve enerji absorpsiyon kabiliyeti açısından onları özellikle enerji, robotik, biyomedikal mühendisliği gibi disiplinlerde son derece cazip hâle getirmektedir (Qiu vd., 2024). Bununla birlikte, TPMS yapılarının karmaşık geometrik doğası, geleneksel imalat yöntemleri ile üretimlerini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar, özellikle katmanlı imalat teknolojilerindeki (additive manufacturing) gelişmeler sayesinde büyük ölçüde aşılmıştır. Böylece, bu sofistike yapılar günümüzde daha hassas ve tekrarlanabilir şekilde üretilebilmektedir. TPMS yüzeylerinin ilk örnekleri, 19. yüzyılda Schwarz tarafından tanımlanan Diamond (Elmas) yüzeyi ve Neovius tarafından tanımlanan Neovius yüzeyidir. Daha sonra,

Primitive, Gyroid, Hexagonal gibi çeşitli minimal yüzeyler keşfedilmiştir. 1970 yılında Alan Schoen tarafından tanımlanan Gyroid yapısı, TPMS yapıları arasında en dikkat çekici ve en yaygın kullanılan örneklerden biri hâline gelmiştir (Yeranee & Rao, 2022). Şekil 3.2’de TPMS yapılarının temsili görselleri verilmekte olup, Tablo 3.1’de farklı TPMS birim hücrelerine ait matematiksel tanımlamalar sunulmaktadır.



Şekil 3.2 Üçlü periyodik minimal yüzeylerin örneği (Al-Ketan vd., 2020)

Tablo 3.1 Farklı TPMS birimlerinin matematiksel ifadeleri (Feng vd., 2022)

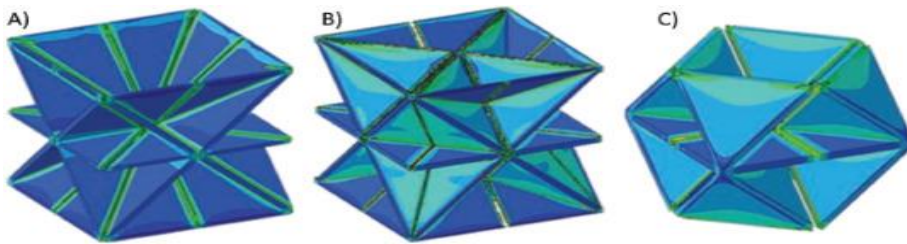
Birim adı	Matematiksel ifadeler	3D Modelleri
P	$f(x, y, z) = \cos(\omega_x x) + \cos(\omega_y y) + \cos(\omega_z z) = C$	
G	$f(x, y, z) = \sin(\omega_x x) \cos(\omega_y y) + \sin(\omega_z z) \cos(\omega_x x) + \sin(\omega_y y) \cos(\omega_z z) = C$	
D	$f(x, y, z) = \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) - \sin(\omega_x x) \sin(\omega_y y) \sin(\omega_z z) = C$	
I-WP	$f(x, y, z) = 2[\cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) + \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) + \cos(\omega_z z) \cos(\omega_x x)] - [\cos(2\omega_x x) + \cos(2\omega_y y) + \cos(2\omega_z z)] = C$	
F-RD	$f(x, y, z) = 4 \cos(\omega_x x) \cos(\omega_y y) \cos(\omega_z z) - [\cos(2\omega_x x) \cos(2\omega_y y) + \cos(2\omega_x x) \cos(2\omega_z z) + \cos(2\omega_y y) \cos(2\omega_z z)] = C$	
I ₂ -Y**	$f(x, y, z) = -2[\sin(2\omega_x x) \cos(\omega_y y) \sin(\omega_z z) + \sin(\omega_x x) \sin(2\omega_y y) \cos(\omega_z z) + \cos(\omega_x x) \sin(\omega_y y) \sin(2\omega_z z)] + \cos(2\omega_x x) \cos(2\omega_y y) + \cos(2\omega_y y) \cos(2\omega_z z) + \cos(2\omega_x x) \cos(2\omega_z z) = C$	

3.1.3. Kabuk Kafes Yapıları

Katmanlı imalat (Eİ) teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, geleneksel dikme veya destek temelli hücre geometrilerinden farklı olarak, plaka tabanlı hücresel yapıların tasarımı ve üretimi mümkün hâle gelmiştir. Bu tür yapılar, çoğu zaman TPMS yapılarla benzerlik gösterse de sıfır ortalama eğrilik şartını taşımamaları nedeniyle ayrı bir kategori olarak değerlendirilmekte ve literatürde kabuk kafes yapıları (shell-lattices) olarak adlandırılmaktadır (Maconachie vd., 2019).

Kabuk kafes yapılar, kapalı hücreli plaka sistemlerinden oluşur ve özellikle düşük yoğunlukta yüksek elastik modül ve mekanik dayanım sunmaları ile dikkat çeker. Yapılan araştırmalar, bu yapıların benzer yoğunluklara sahip açık hücreli destek temelli yapılara kıyasla daha üstün elastik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kabuk kafeslerin üretimi sırasında, özellikle toz bazlı katmanlı imalat teknolojilerinde ortaya çıkan toz giderme sorunları, üretim sürecinde önemli bir kısıtlayıcı faktör olarak öne çıkmaktadır.

Kabuk kafes yapılar, doğadaki birçok biyolojik yapıda yaygın olarak görülür; örneğin deniz kestanelerinin iskelet yapısı veya biyolojik kübik membranlar, bu yapıya sahip doğal sistemlerin başlıca örnekleridir. Bu yapılar genellikle yüksek ortalama sertlik, mükemmel enerji absorpsiyonu, çok yönlü yük taşıma kapasitesi ve akışkan geçirgenliği gibi çok işlevli özellikler sunan tek, sürekli ve düzgün eğrilikli kabuk yüzeylerinden oluşmaktadır (Liu vd., 2022). Ayrıca, kabuk kafeslerin açık hücreli geometrisi, modern katmanlı üretim teknikleriyle büyük ölçüde uyumludur. Bu da onları, özellikle biyomedikal implantlar, enerji emici yapılar ve ısı transfer uygulamaları gibi çok disiplinli mühendislik alanlarında cazip hâle getirmektedir. Şekil 3.3'te, basit kübik (SC), hacim merkezli kübik (BCC) ve yüzey merkezli kübik (FCC) kristal yapıların en yakın paketlenmiş düzlemlerine plakaların yerleştirilmesiyle oluşturulan kabuk bazlı birim hücrelerin temsili modelleri sunulmuştur.



Şekil 3.3 Kabuk kafes yapılar; a) SC-BCC, b) SC-BCC-FCC, c) SC-FCC (Maconachie vd., 2019)

4. LİTERATÜR TARAMASI

Aktitiz ve arkadaşları (Aktitiz vd., 2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SLA cihazı kullanılarak üç boyutlu polimer malzemeler üretilmiş ve farklı sürelerde (30, 60, 180 ve 300 dakika) uygulanan UV ikincil kürleme işleminin, bu yapıların mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde çekme testi ve çentik darbe testi kullanılmış; termal özellikler ise diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi ile analiz edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre, kürleme süresinin artmasıyla birlikte elastisite modülü ve maksimum çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Çentik darbe testi sonuçları ise, kürleme süresindeki artışa bağlı olarak malzemelerin daha gevrek bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Özellikle, 30 dakika kürleme uygulanan numunelerde darbe dayanımı 20,58 kJ/m² olarak ölçülürken, 300 dakika kürlenen numunelerde bu değer 2,52 kJ/m² seviyelerine kadar düştüğü rapor edilmiştir. Aktitiz ve arkadaşları (Aktitiz vd., 2021) tarafından yürütülen çalışmada, takviye malzemesi olarak titanyum dioksit (TiO₂) nanopartikülleri tercih edilmiş ve farklı konsantrasyonlarda (%0,25, %0,5 ve %1) TiO₂ içeren reçine karışımları hazırlanarak, bu karışımlar SLA cihazı kullanılarak üç boyutlu polimer yapılar hâlinde üretilmiştir. Üretilen yapıların morfolojik, termal ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, çekme testleri, Izod-Charpy darbe testleri, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi ve termogravimetrik analiz (TGA) gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, çekme ve darbe testleri, TiO₂ katkı miktarının artışıyla birlikte polimer yapıların kırılma dayanım seviyesinin yükseldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, rijit nanopartikül ilavesine bağlı olarak oluşan hidrodinamik etkiler sayesinde elastisite modülünde saf polimere kıyasla artış gözlemlenmiştir. DSC analiz sonuçlarına göre ise TiO₂ nanopartiküllerinin, karbon-karbon bağlarının reaksiyonlarını kısmen engelleyerek kürleme mekanizmasını etkilediği belirlenmiştir.

Chockalingam ve arkadaşları (Chockalingam vd., 2006) çalışmalarında, stereolitografi (SL) ile üretilen bileşenlerin mekanik özellikleri üzerinde en etkili proses parametresi olarak katman kalınlığını belirlemişlerdir. Deneylerinde epoksi bazlı CIBA SL5530 reçinesi en uygun malzeme olarak seçilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, SL parçalarının mekanik dayanımı, doğrudan katman kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Katman kalınlığının azalmasıyla birlikte parçaların mukavemetinde artış gözlemlenmiş;

dolayısıyla daha ince katman kalınlıklarının daha yüksek mekanik performans sağladığı sonucuna varılmıştır.

Saini ve arkadaşları (Saini vd., 2020), SLA yöntemiyle üretilen polimer malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde farklı baskı yönelimlerinin etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, maksimum çekme ve basma dayanımının sırasıyla $22,5^\circ$ ve $67,5^\circ$ açıyla üretilen numunelerde elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, $67,5^\circ$ baskı yönelimine sahip numunelerin en yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Darbe dayanımı açısından ise en yüksek dayanıklılık, 0° baskı yönelimiyle üretilen numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, baskı katmanlarının çekiç darbesinin yönüne dik olmasıyla açıklanmakta olup, darbe kuvvetine karşı maksimum direnç göstermesini sağlamaktadır. Andrew ve arkadaşları (Andrew vd., 2021), farklı temel (SC, BCC ve FCC) ve hibrit (SC-BCC, SC-FCC ve SC-BCC-FCC) 3 boyutlu plaka-kafes yapılar tasarlayarak, bu yapıları stereolitografi (SLA) yöntemiyle üretmişlerdir. Üretilen yapılar üzerinde düşük hızlı düşürme ağırlıklı darbe testleri gerçekleştirilmiş ve yapıların dinamik ezilme davranışları ile enerji soğurma kapasiteleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, SC-BCC-FCC yapılar en yüksek tokluğu sergilemiş; bunu sırasıyla SC-FCC, SC-BCC, SC, FCC ve BCC yapı türleri takip etmiştir.

Andrew ve arkadaşları (Andrew vd., 2019), geometrik olarak uyarlanmış hücre duvarı kalınlığına sahip 3D baskılı petek yapıların dinamik davranışlarını ve enerji emme kapasitelerini değerlendirmek amacıyla düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında düzensiz altıgen, girintili altıgen ve chiral olmak üzere üç farklı hücre topolojisine sahip uyarlanmış petek yapılar incelenmiştir. Sonuçlara göre, tüm uyarlanmış yapılar benzer darbe tepkileri ve enerji emme performansı göstermiştir. Ayrıca, bu yapıların, eşit kütleye sahip uyarlanmamış yapı türlerine kıyasla yaklaşık %50–60 oranında daha yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Lu ve arkadaşları (Lu vd., 2022) yaptıkları çalışmada, gyroid yapıya sahip biyo-ilhamlı bir Al_2O_3 seramik iskele tasarlamış ve stereolitografi (SL) eklemeli üretim yöntemiyle üretmişlerdir. Ardından, Al_2O_3 seramik yapıya erimiş Al infiltre edilerek Al_2O_3/Al seramik-metal hibrit yapısı oluşturulmuştur. Bu yapıların performansları, yarı statik sıkıştırma deneyi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, bozulmamış Al_2O_3 iskelesinin yarı statik basınç dayanımı 14,36 MPa iken, Al_2O_3/Al seramik-metal hibrit yapının dayanımı 89,06 MPa'ya kadar çıkmıştır.

Kang ve arkadaşları (Kang vd., 2022) yaptıkları çalışmada, kemik doku mühendisliği uygulamaları için kafes yapılarına sahip 3D iskeleler oluşturmak amacıyla

fotokürlenebilir hidroksiapatit (HA) süspansiyonları hazırlamış ve optimize etmişlerdir. Bu optimize edilmiş HA süspansiyonunun SLA yöntemiyle iskele üretimi için uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, oktahedral, dairesel ve çerçeve yapılarla tasarlanan HA iskelelerinin mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve oktahedral iskele yapısının $5,6 \pm 0,85$ MPa ile en yüksek basınç dayanımını sergilediği bulunmuştur.

Yap ve arkadaşları (X. Y. Yap vd., 2021) yaptıkları çalışmada, katı desteklere ve farklı topolojilere sahip alümina mikro kafes yapılarını stereolitografi 3D baskı yöntemiyle üretmişlerdir. Bu çalışmada, basit kübik, oktet kafes ve Kelvin hücresi geometrilerinin mekanik özellikleri ve kırılma davranışları deneyler ve sayısal simülasyonlar yoluyla incelenmiştir. Mekanik analizler sonucunda, özgül sertlik ve mukavemetin basit kübik kafeslerde en yüksek olduğu, bunu takiben oktet kafes ve son olarak Kelvin hücresi kafeslerinin geldiği belirtilmiştir.

Moniruzzaman ve arkadaşları (Moniruzzaman vd., 2020) yaptıkları çalışmada, biyouyumlu stereolitografi (SLA) kullanılarak üretilen 3D baskılı kafes yapıların mekaniği üzerindeki tasarım kararlarının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, %70 gözenekli gövde merkezli kübik topolojilerin elastik modüllerinin 360 MPa ile 135 MPa arasında değiştiğini ve kafeslerin elastik modüllerinin birim hücre sayısı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, elastik modüllerin, birim hücre topolojisine göre 101 MPa ile 260 MPa arasında değiştiğini ve kirişlerin daha büyük bir oranının yükleme yönüyle hizalandığında elastik modüllerin arttığını ifade etmişlerdir.

Mei ve arkadaşları (Mei vd., 2019) yaptıkları çalışmada, elmas, kübik, gövde merkezli ve oktet kafes olmak üzere dört farklı tip seramik kafesi SLA yöntemiyle üretmişlerdir. Ayrıca, bu kafeslerin mekanik performansını artırmak amacıyla hücresel ünitelerin tasarımını deney ve simülasyon yoluyla optimize etmiş ve seramik kafesleri kimyasal buhar infiltrasyonu (CVI) ve ısıtma işlemiyle güçlendirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, SiC kaplamanın (120/240 saat için CVI) basınç dayanımını yaklaşık 4,5/6,4 kat, basınç sertliğini ise yaklaşık 2,3/2,7 kat daha yüksek hale getirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, SiC kaplı kafeslerin 1300 °C'de daha fazla ısıtma işlemi tabi tutulması durumunda, her basınç dayanımı, ilk maksimum dayanım ve sertliğin sırasıyla %82, %158 ve %66 oranında iyileştiğini ifade etmişlerdir.

Ling ve arkadaşları (Ling vd., 2019) yaptıkları çalışmada, üç farklı yoğunlukta oktet kafes yapısı oluşturmak amacıyla iki farklı polimer reçinesi kullanarak SLA yöntemiyle üretim gerçekleştirmişlerdir. Bu yapıların mekanik davranışlarını hem yarı statik hem de

dinamik basınç yüklemesi altında incelemişlerdir. Çalışma sonucunda hem standart gri reçine numunesinin hem de dayanıklı reçine numunesinin akma gerilmelerinin, octet kafes yapısının bağıl yoğunluğu ile monoton bir şekilde arttığını belirtmişlerdir.

Doodi vd. (Doodi & Gunji, 2024) yaptıkları çalışmada, balık türlerinin deri katmanlarındaki pulların üst üste binen desenlerinden ve bambu ağacı yapısından esinlenerek yeni bir hibrit kafes yapısı geliştirmişlerdir. Önerilen dairesel alana dayalı olarak %20, %30, %40 ve %50 örtüşen alanlara sahip kafes hücreleri tasarlamışlardır. Birim hücre duvar kalınlığı 0,4 mm ile 0,6 mm arasında değişmektedir. Çalışmalarında, 40x40x40 mm sabit hacme sahip, farklı dairesel çaplar, örtüşen alanlar ve birim duvar kalınlığına sahip yapıları Fusion 360 yazılımı ile modellemişler ve bu 3D kafes yapılarını stereolitografi (SLA) tekniği ile üretmişlerdir. Ardından, 3D yazdırılmış numuneleri yarı statik basınç testine tabi tutmuşlardır. Çalışmalarının sonucunda, yapıların sayısı, hücre boyutu, birim duvar kalınlığı ve üst üste binme özellikleri gibi parametrelerin, kafes yapıların enerjiyi emme ve yükleri eşit şekilde dağıtma kabiliyetini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir.

Dar ve arkadaşları (Dar vd., 2020) yaptıkları çalışmada, 3D yazdırılmış polimerik mikro kafes yapıların basınç davranışı, deformasyon mekanizması ve enerji emme kabiliyeti üzerinde kafes geometrisinin etkisini araştırmaya odaklanmışlardır. Projeksiyon mikrostereolitografi (PμSL) tabanlı 3D yazdırma tekniği ile basılmış periyodik gövde merkezli kübik (BCC) mimari birim hücrelerden oluşan kafes çekirdeklerinin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, incelenen kafes çeşitleri arasında, küçük hücre boyutuna sahip BCC kafesinin elastik sertlik, mukavemet ve enerji emilim özellikleri açısından daha iyi sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, birim hücre boyutunun ve sayısının yanı sıra, diğer fiziksel kafes parametrelerinin de kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışma, mikro kafes yapıların mekanik performansını optimize etmek için geometrik parametrelerin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Küçük hücre boyutları, daha iyi elastik özellikler ve enerji emme kapasitesine sahip yapıların elde edilmesini sağlamaktadır.

Peloquin ve arkadaşları (Peloquin vd., 2023) yaptıkları çalışmada, SLA 3D baskı ile üretilen levha-TPMS ve dikme tabanlı kafes yapılarının yapı geometrisi ve malzeme viskozitesinin basılabilirlik, mekanik performans ve hacimsel doğruluk üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. TPMS (üçlü periyodik minimal yüzey) gyroid ve dikme tabanlı elmas kafesler üzerinde yapılan çalışmada, temel reçine malzemesinin viskozitesinin

yapının gözenekliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Gyroid kafes yapısının, tüm ölçülen gözenekliliklerde ve malzemelerde elmas kafesten mekanik olarak daha iyi performans gösterdiği ve sürekli olarak daha büyük Young modülü ile akma mukavemeti elde ettiği tespit edilmiştir.

Bogusz vd. (Bogusz vd., 2022) yaptıkları çalışmada, beş farklı 3D topoloji tasarlamış ve bunları SLA tipi eklemeli baskı tekniği ile üretmişlerdir. Üretilen yapıları yarı statik eksenel basınç testine tabi tutmuşlar ve testler sırasında kaydedilen basınç eğrilerinden temel malzemeleri ve enerji emici özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, enerji emen parametreleri analiz edildikten sonra, yıldız ve altıgen topolojilerinin sırasıyla 6,14 J ve 5,92 J ile en yüksek emilen enerjiye ulaştığı sonucuna varmışlardır. Bu bulgular, farklı topolojilerin enerji emme kapasitesinin önemli bir faktör olduğunu ve bu tür yapıların özellikle enerji emme ve darbe koruma uygulamalarında potansiyel kullanımlarını ortaya koymaktadır.

Zhang ve arkadaşları (K. Zhang vd., 2021) yaptıkları çalışmada, Al_2O_3 seramiklerini ince tanecikler ve sinterleme katkı maddeleri ekleyerek üretmişlerdir. İnce tanecikler Al_2O_3 seramik tozları iken, sinterleme katkı maddeleri olarak TiO_2 ve MgO kullanılmıştır. Al_2O_3 seramikleri, stereolitografi tabanlı eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş ve ardından bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, Al_2O_3 seramiklerinin bağıl yoğunluğu, mikro yapısı, mekanik özellikleri ve fiziksel özellikleri detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Sonuç olarak, yüksek hassasiyete ve yüksek basınç dayanımına sahip kusursuz Al_2O_3 seramik kafes yapıları üretildiği belirtilmiştir.

Quintana ve arkadaşları (Quintana vd., 2010) yaptıkları çalışmada, stereolitografi ile üretilen parçaların mekanik dayanıklılığını etkileyebilecek belirli yapı yönelimi parametrelerini araştırmak için deneylerin istatistiksel tasarım (DOE) yaklaşımını kullanmışlardır. Bu amaçla, eksen, düzen ve konum olmak üzere üç faktörü test etmişlerdir. Her bir düzen ve eksen kombinasyonu için üç numune üretilmiş ve numuneler, platformun merkezinden uzaklığa bağlı olarak konum 1, 2 veya 3 olarak etiketlenmiştir. İstatistiksel analizlerden elde edilen sonuçlar, eksen ve konumun nihai çekme gerilimi (UTS) veya elastikiyet modülü (E) üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Ancak, düzenin (yani bir numunenin düz veya bir kenarda inşa edilip edilmediğinin) UTS ve E üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, yapı yönelimi parametrelerinin 3D baskı parçalarının mekanik özelliklerini optimize etmek için dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Kazemi (Kazemi & Rahimi, 2018) yaptıkları çalışmada, parçaların çekme dayanımını etkileyen en önemli parametrelerin katman kalınlığı, üretim yönü ve kürleme süresi olduğunu belirtmişlerdir. Bu parametrelerin SLA (stereolitografi) ile ürettikleri parçalar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, dikey üretim yöneliminin, yatay üretim yönelimine kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ürettiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, kürleme süresinin artması ve tabaka kalınlığının azalmasıyla çekme dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Bu bulgular, SLA ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini optimize etmek için bu parametrelerin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Hu ve arkadaşları (Hu vd., 2022) yaptıkları çalışmada, hassas döküm için silika bazlı seramik çekirdeklerin şekillendirme kalitesini artırmak amacıyla, içlerinde kafes yapıları bulunan boş çekirdekler tasarlamış ve stereolitografi kullanarak üretmişlerdir. Çalışmalarının sonunda, bu çekirdeklerin eğilme mukavemetinin oda sıcaklığında 11,94 MPa ve 1.500 °C'de 0,345 mm'lik bir sürünme deformasyonu ile 12,87 MPa'ya ulaştığını belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, kafes yapılarıyla güçlendirilmiş seramik çekirdeklerin yüksek sıcaklık koşullarında bile iyi mekanik performans gösterdiğini göstermektedir.

Shin ve Chang (Shin & Chang, 2021) yaptıkları çalışmada, ticari bir dijital ışık işleme (DLP) projektörünü temel alan düşük maliyetli, yüksek çözünürlüklü bir mikro stereolitografik sistem geliştirmişler ve 100 µm kadar küçük birim hücre uzunlukları başarıyla üretmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, hücre boyutunu 150 µm'den 100 µm'ye düşürerek, basınç sertliğinin 8,8 MPa'dan 11,1 MPa'ya çıktığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kafes yapısı üzerinde nikelin kimyasal olmayan kaplanmasını kolaylaştırmak amacıyla farklı ön işlemler denemişlerdir. Grafen süspansiyonunda daldırma kaplama ön işlemi, en başarılı yöntem olarak bulunmuş ve bu işlemle, mukavemetin 5,3 kat, sertliğin ise 3,6 kat arttığı gözlemlenmiştir. İç kısmında çok hafif ve eksik bir nikel kaplama bile, yapısal sertlik ve mukavemeti iki kattan fazla arttırmıştır. Bu sonuçlar, mikro kafes yapıların mekanik performansını önemli ölçüde iyileştirmek için kaplama işlemlerinin etkinliğini göstermektedir.

Keshavarzan ve arkadaşları (Keshavarzan vd., 2020) yaptıkları çalışmada, gözenek morfolojisinin yanı sıra gözenekliliğin, basınç altındaki deformasyon ve hasar mekanizmaları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı gözenekliliklere sahip P ve G yapıları Dijital Işık İşleme (DLP) tekniği ile üretmişlerdir. Tüm numuneler, çeşitli basınçlı yükleme/boşaltma döngüleri altında incelenmiş ve gerilim-şekil değiştirme tepkileri ile deformasyonun yerinde görüntüleri elde edilmiştir. Sonuç olarak,

G yapılarının ana kırılma mekanizmasının birincil ve ikincil kayma bantlarının oluşumu olduğunu belirtmişlerdir. P yapıları ise, yüksek gözenekli yapılarda en üst katmandan, düşük gözenekli yapılarda ise numunenin ortasına doğru statik basınç testi sırasında katman katman kırıldığını gözlemlemişlerdir. Bu bulgular, gözenekliliğin yapıların davranışını ve hasar mekanizmalarını nasıl şekillendirdiğini vurgulamaktadır.

Wang ve arkadaşları (Wang vd., 2020) yaptıkları çalışmada, deneysel ve sayısal yöntemleri birleştirerek, stereolitografi yöntemiyle üretilen kafes yapıların basınç davranışını ve enerji emilimini araştırmışlardır. Çalışmalarında, düzgün gövde merkezli kübik (U-BCC), dereceli gövde merkezli kübik (G-BCC), z eksenli takviyeli düzgün gövde merkezli kübik (U-BCCz) ve z eksenli takviyeli dereceli gövde merkezli kübik (G-BCCz) olmak üzere dört farklı kafes yapısını incelemişlerdir. Bu kafesler üzerinde basınç testleri yapmış ve sıkıştırma sürecini sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak simüle etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, BCCz yapısının BCC'ye kıyasla daha yüksek modül ve mukavemete sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, düzgün kafeslerin küçük sıkıştırma mesafelerinde daha iyi enerji emme yetenekleri gösterdiği, dereceli kafeslerin ise daha büyük sıkıştırma mesafelerinde daha fazla enerji emdiği belirtilmiştir. Bu bulgular, farklı kafes yapılarının enerji emme ve basınç dayanımındaki davranışlarını daha iyi anlamayı sağlamaktadır.

Ding ve arkadaşları (Ding vd., 2019) yaptıkları çalışmada, SiC seramiğinin stereolitografi sırasında karşılaştığı zorlukları incelemiş ve Al_2O_3 ile ZrO_2 seramikleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmada, parçacık boyutunun, katı yüklemenin, stereolitografi parametrelerinin ve foto başlatıcı türü ile konsantrasyonunun SiC bulamaçlarının kürlenme kabiliyeti üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda, parçacık boyutunun küçülmesi ve katı yüklemenin artmasıyla UV kürlenmesinin zorlaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca, optimum ışık yoğunluğunun $7500 \mu W/cm^2$ ve en iyi pozlama süresinin 90 saniye olarak belirlendiğini ifade etmişlerdir. Bu bulgular, SiC seramiklerinin stereolitografi ile işlenebilirliğini iyileştirmek için önemli parametreleri ortaya koymaktadır.

Chen ve arkadaşları (Chen vd., 2021) yaptıkları çalışmada, $ZrO_2-Al_2O_3$ numunelerini SLA yöntemi ile üretmiş ve sinterleme sıcaklığının $ZrO_2-Al_2O_3$ biyoseramiklerinin özellikleri üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, sinterleme sıcaklığının $1450^\circ C$ 'den $1600^\circ C$ 'ye çıkmasıyla birlikte, ortalama bağıl yoğunluğun, Vickers sertliğinin ve kırılma tokluğunun maksimum değerlerine ulaştığını belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, sinterleme işleminin seramik biyomalzemelerin

mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Zhang ve arkadaşları (J. Zhang vd., 2023), TPMS kafes yapılarının ses emilimi alanındaki uygulamasını genişletmek amacıyla yüzey alanını artırarak ve kafes yapısı içindeki gözeneklerin sayısını ve boyutunu değiştirerek ses emilimi ve yük taşıma yetenekleri sergileyen çok işlevli TPMS kafes yapıları tasarlamışlardır. Çalışmada, temel olarak gyroid kafes yapısı kullanılmış ve çok tabakalı paralel tasarım yoluyla elde edilen ses emme özellikleri ve mekanik performans sergileyen çok tabakalı kafes yapıların tasarımı sunulmuştur. Bu kafes yapıları SLA yöntemi ile üretilmiştir. Sonuç olarak, çok tabakalı yapının tek tabakalı kafes yapısından daha iyi performans gösterdiği belirtilmiş ve sıkıştırma altında, çok tabakalı yapının elastik modülünün 0,43 katı ve akma dayanımının 0,52 katı daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Özetleyecek olursak; SLA ile üretilen seramik yapılar için önemli çalışmalar gerçekleştirilmesine rağmen kafes geometrilerinde nanopartikül kullanımının mekanik ve termal performansına dair bilgi boşlukları devam etmektedir. Literatüre bakıldığında çalışmaların çoğunluğunda kafes geometrilerinde nanopartikül kullanılmadığı ya da bireysel kafes geometrilerine odaklandığı görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada tamamlayıcı özellikleri nedeniyle seçilen SiC, hBN ve Al₂O₃ olmak üzere üç farklı seramik tozu ile üç farklı kafes geometrisi kullanılarak, bu yapıların etkileşimi hem termal hem de mekanik açıdan incelenmiş ve böylece mevcut bilgi boşluklarının giderilmesi hedeflenmiştir. Bu seramik tozların seçilmesinin sebebi SiC olağanüstü mukavemet ve termal iletkenlik gösterirken; hBN mükemmel işlenebilirlik ve termal yalıtım sunar; Al₂O₃ mekanik dayanıklılık ve biyouyumluluğun bir karışımını sunmaktadır. Malzeme özellikleri ile yapısal tasarım arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla, üç farklı kafes yapısı (basit kübik, elmas ve oktahedral) tercih edilmiştir. Basit kübik kafesler hafiflik ve sertlik dengesini sağlarken; elmas kafesler darbe emme yetenekleriyle, oktahedral kafesler ise basınç altında sergiledikleri esneklikle öne çıkmaktadır. Bu tez çalışması, bu kombinasyonlar ile elde edilen hibrit yapıların mekanik ve termal performansı nasıl etkilediğini sistemsel bir analiz şeklinde sunmayı amaçlamaktadır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan seramik tozlar (Al_2O_3 , SiC ve hBN), Türkiye'nin Ankara ilinde bulunan Nanografi firmasından temin edilmiştir. Fotokürlenebilir reçine olarak ise Anycubic markasına ait standart reçine (reçine + fotobaşlatıcı) kullanılmıştır. Reçinenin teknik özellikleri Tablo 5.1'de sunulmaktadır. Ayrıca, temizlik işlemlerinde kullanılan saf izopropil alkol (İPA), Luxor Kimya (İstanbul) firmasından tedarik edilmiştir. Çalışmada kullanılan seramik tozlara ait temel fiziksel özellikler Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tablo 5.1 Ticari fotokürlenebilir reçinenin özellikleri

Parametre	Değer
Katılaştırma dalga boyu	355-410nm
Sertlik (D)	84,0
Viskozite (25 °C'de)	150–200 mPa.s
Büzülme	%3,72-4,24
Katı yoğunluk	1,05-1,25 g/cm ³
Çekme Dayanımı	36-52 MPa
Uzama	%11-20

Tablo 5.2 Kullanılan seramik tozların özellikleri

Seramik Tozu	Safılık	Boyut	Formu	Kristal Türü
hBN	%99,7	790nm	Nanopartikül	Hekzagonal
Al_2O_3	%99,95	290nm	Nanopartikül	Rhombohedral
SiC	%99,5+	790nm	Nanopartikül	Beta

5.2. Yöntem

Al_2O_3 , SiC ve hBN seramik tozları, 154 μ m göz açıklığına sahip Loyka marka bir elek ile 5 dakika süreyle elenmiştir. Toz ve reçine miktarları hassas terazi ile tartılmış; reçine, manyetik karıştırıcıda 15 dakika süreyle ön karıştırmaya tabi tutulmuştur. Tozlar, reçineye ağırlıkça %0,5 oranında olacak şekilde, toplam miktar dört eşit parçaya ayrılarak her 5 dakikada bir ilave edilmiştir. Böylece homojen bir bulamaç elde edilmesi sağlanmıştır. Karışım, 2 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ardından,

reçine-toz karışımı, karıştırma esnasında oluşan hava kabarcıklarının uzaklaştırılması amacıyla 15 dakika süreyle stabil ortamda bekletilmiştir.

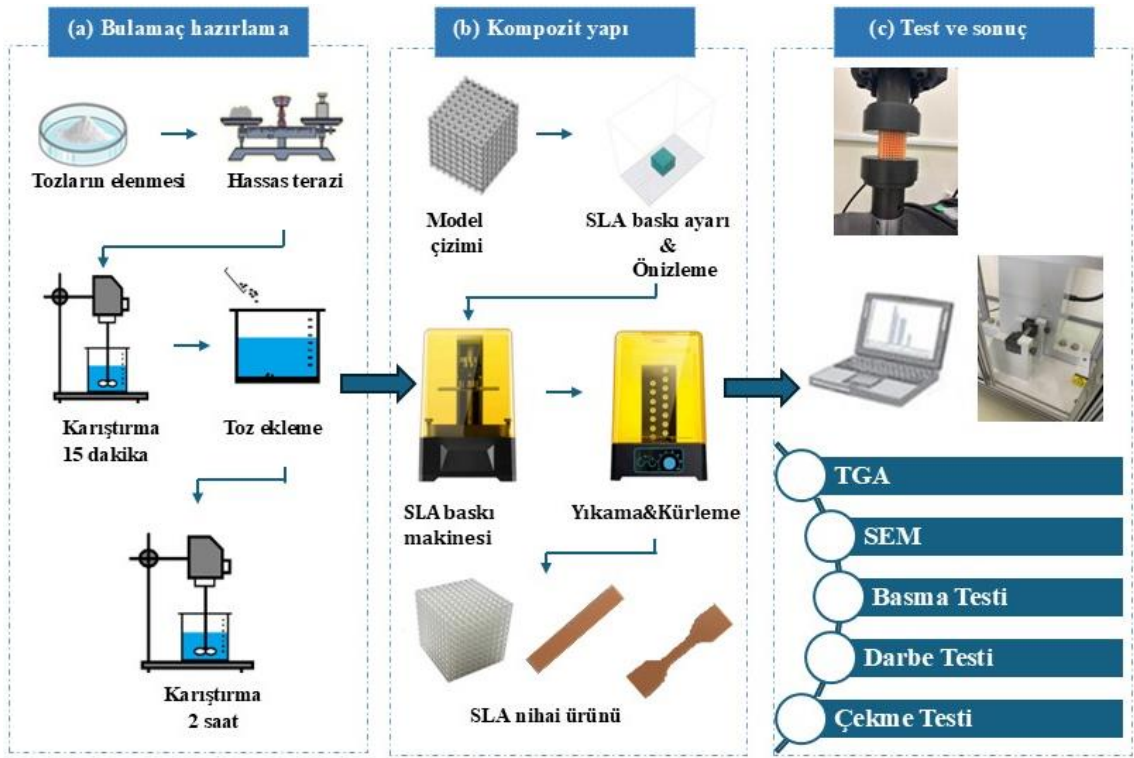
Elde edilen homojen karışımlar, SLA cihazına aktarılmıştır. Test numuneleri ve kafes yapıları SpaceClaim yazılımında modellenerek. stl formatında kaydedilmiş, ardından Anycubic yazılımı ile baskıya uygun şekilde yerleştirilmiş ve USB bellek aracılığıyla cihaza aktarılmıştır. Baskı kalitesini artırmak ve parametreleri optimize etmek amacıyla çeşitli kafes örnekleri basılmış ve fiziksel kusurlar açısından incelenmiştir.

Kafes yapılarının hacimsel doluluk oranı %10 olarak belirlenmiştir. 50×50×50 mm boyutlarındaki kafes yapılar için çubuk çapları, basit kübik yapıda $\varnothing 1,11$ mm, oktahedral yapıda $\varnothing 0,57$ mm, elmas yapıda ise $\varnothing 0,81$ mm olarak ayarlanmıştır. Numuneler, Shenzhen Anycubic Technology Co. Tarafından üretilen Photon Mono M7 Pro SLA 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Yazıcıya ait temel baskı parametreleri Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Baskı sonrası numunelerin yüzeyinde kalan reaktif reçinenin uzaklaştırılması için saf İPA ile temizlik yapılmıştır. Kürleme işlemi, 6 dakika boyunca 405 nm dalga boyuna ve 25 W güce sahip Wash&Cure 2.0 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sürece ait genel akış diyagramı Şekil 5.1'de sunulmaktadır.

Tablo 5.3 SLA 3D baskı parametreleri

Parametre	Değer
Katman Kalınlığı	0,050mm
Normal Pozlama Süresi	2,200s
Boş Zaman	0,500s
Alt Pozlama Süresi	25,000s
Alt Katmanlar	7
Anti-alias	4
Z Kaldırma Mesafesi	8,000mm
Z Kaldırma Hızı	6,000mm/s
Z Geri Çekme Hızı	6,000mm/s

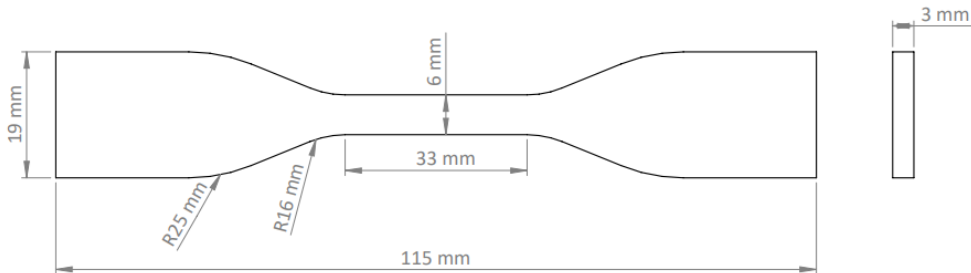


Şekil 5.1 Deneyel sürecin akış şeması

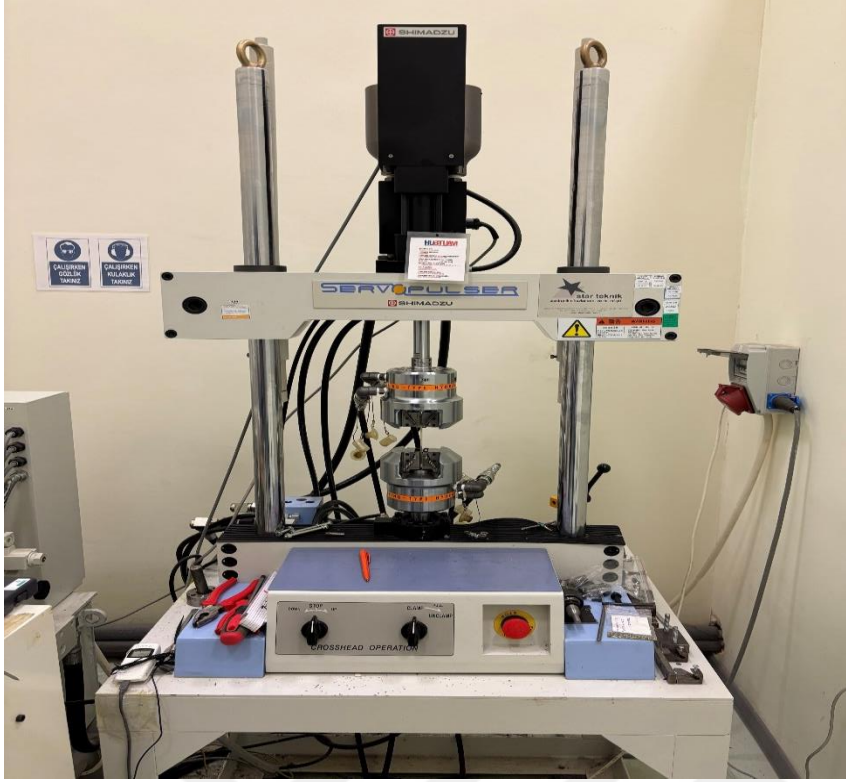
5.3. Numunelere Uygulanan Testler

5.3.1. Çekme Testi

Çekme testi, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan temel yöntemlerden biridir. Bu çalışma kapsamında, ASTM D638-14 standardına uygun olarak üretilen test numuneleri (Şekil 5.2), SLA 3D yazıcı ile hazırlanmıştır. Testler, Shimadzu EHF-LV005K2-010 model 5 kN kapasiteli dinamik test cihazı (Şekil 5.3) kullanılarak, oda sıcaklığında ve 5 mm/dk ilerleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri üzerinden elastisite modülü, maksimum çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikler hesaplanmıştır; seramik toz katkılarının bu özelliklere etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 5.2 ASTM D638-14 standardına uygun çekme test numunesi ölçüleri

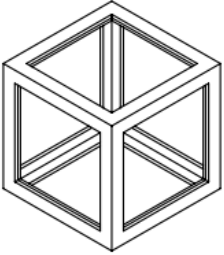
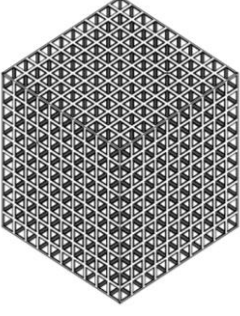
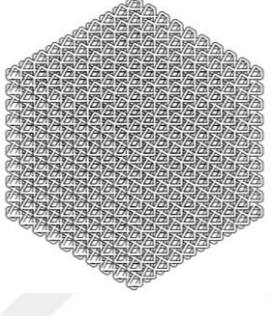
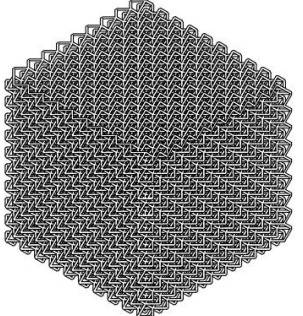


Şekil 5.3 Çekme ve basma testlerinin gerçekleştirildiği cihaz

5.3.2. Basma Testi

Kafes yapıların basma dayanımını belirlemek amacıyla tek eksenli yarı-statik basma testleri uygulanmıştır. Testler, oda sıcaklığında, yukarıda belirtilen Shimadzu cihazı ile 3,5 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Numuneler, cihazın iki çelik plaka arasına yerleştirilerek, üst plakadan aşağıya doğru kuvvet uygulanmak suretiyle kırılma anına kadar test edilmiştir. Bu test ile kafes yapıların mekanik davranışları analiz edilmiştir. Testte kullanılan yapıların geometrik bilgileri Tablo 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.4 Kullanılan kafes yapılarının geometrik parametreleri

Birim Hücre Modeli			
Destek çapı (mm)	1,11	0,81	0,57
Birim hücre uzunluğu (mm)	5	5	5
Birim hücre yüksekliği (mm)	5	5	5
Hücre sayısı	10x10	10x10	10x10
Hacim (%)	10	10	10
CAD Modeli			
Kafes tipi	Basit Kübik	Elmas	Oktahedral
Kafes boyutu (uzunlukx genişlikx yükseklik) Birim: mm	50x50x50	50x50x50	50x50x50

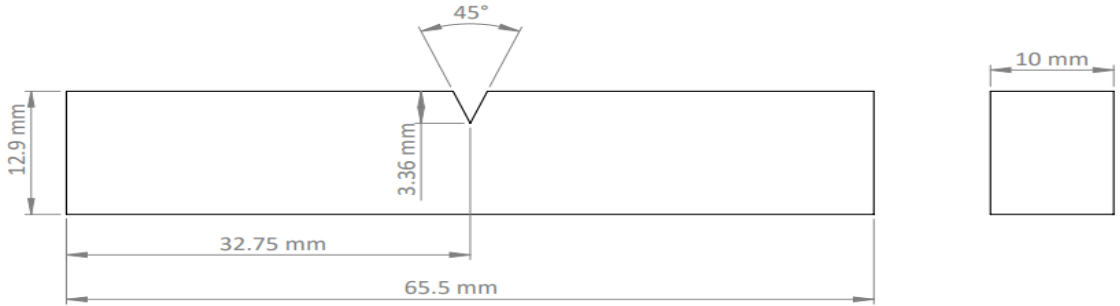
5.3.3. Çentik Darbe Testi

Çentik darbe testleri, numunelerin kırılma sırasında ne kadar enerji absorbe ettiğini belirlemek amacıyla uygulanmıştır. ASTM D256-04 standardına uygun olarak hazırlanan çentikli numuneler (Şekil 5.5), Utest UTCI-0450J cihazında (Şekil 5.4) 5,4 m/s darbe hızı ile test edilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen bu testler, seramik tozların darbe dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Darbe enerjisi, numunenin tokluğunun bir göstergesi olup, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$a = \frac{E_c}{h.b_n} \times 10^3 \quad (5.1)$$



Şekil 5.4 Çentik darbe test cihazı



Şekil 5.5 Darbe test numunesinin ölçüleri

5.3.4. Termal Analizler (DTA, TG ve DTG)

Termal analizler, malzemelerin sıcaklığa karşı gösterdiği fiziksel ve kimyasal davranışları incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan karakterizasyon yöntemlerindendir. Bu çalışmada, katkısız ve çeşitli nanoparçacık katkılı kafes yapıların ısı kararlılıkları ve bozunma davranışları, Termogravimetrik Analiz (TGA), Türevsel Termogravimetrik Analiz (DTG) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Termogravimetrik analiz (TGA), bir numunenin zaman veya sıcaklık kontrollü ortamda kütle değişimini hassas biçimde ölçen bir tekniktir. Sıcaklığın artışıyla birlikte gerçekleşen süblimasyon, buharlaşma, termal bozunma, oksidasyon veya kimyasal reaksiyon gibi süreçler sonucunda meydana gelen kütle kayıpları TGA eğrileriyle belirlenebilir. Ancak bu eğriler, olayların meydana geldiği sıcaklık aralıklarını her zaman net biçimde göstermez.

Bu nedenle, TGA eğrilerinin birinci türevi alınarak elde edilen Türevsel Termogravimetrik Analiz (DTG) eğrileri, kütle kaybının sıcaklığa göre değişim hızını verir ve bozunma süreçlerinin daha net ayrıştırılmasını sağlar. DTG matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$DTG = \frac{d(m)}{dT} \quad (5.2)$$

Burada:

m: Numunenin kütlesi (mg)

T: Sıcaklık (°C)

$\frac{d(m)}{dT}$: Sıcaklığa bağlı kütle değişim hızı (mg/°C).

Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ise, numune ile referans malzeme arasındaki sıcaklık farkını ölçerek, endotermik veya ekzotermik olayların sıcaklıklarını ve şiddetlerini belirlemeye yarayan bir tekniktir. DTA yöntemi, TGA ile kütle değişimi gözlenmeyen olayların (örneğin faz dönüşümleri, cam geçişleri) analizinde oldukça etkilidir.

Bu çalışmada hem katkısız hem de Al₂O₃, SiC ve hBN katkılı UV reçine bazlı kafes yapılar, HITACHI STA7300 model termal analiz cihazı kullanılarak karakterize edilmiştir. Analizler, azot atmosferi altında, 25 °C'den 600 °C'ye kadar, 10 °C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan çalışma koşulları altında numune kütleleri şu şekildedir:

Katkısız numune: 4,688 mg

Al₂O₃ katkılı numune: 2,731 mg

SiC katkılı numune: 3,367 mg

hBN katkılı numune: 5,572 mg

Elde edilen TGA, DTG ve DTA eğrileri üzerinden, her bir katkının termal bozunma davranışına etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, katkı türüne bağlı olarak ısı kararlılık ve bozunma sıcaklıklarındaki değişimleri ortaya koyarak, katkı malzemelerinin termal performansına etkisini gözler önüne sermiştir.

5.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüksek enerjili elektron demetinin numune yüzeyine odaklanarak taranması sonucu, yüzey topografisi ve yapısal özellikler hakkında detaylı görüntüler elde etmeyi sağlayan ileri düzey bir karakterizasyon yöntemidir. Bu yöntemde, elektron demeti numune yüzeyindeki atomlarla etkileşime girerek ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik X-ışınları gibi çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyaller, numunenin yüzey morfolojisi, kompozisyonu ve mikroyapısal özellikleri hakkında bilgi sağlar. SEM sistemleri genellikle 1 nm altına kadar çözünürlük sağlayabilen güçlü görüntüleme kapasitesine sahiptir.

Bu çalışmada, nanoparçacık katkısız ve katkılı UV reçine bazlı kafes yapıların basma testi sonrası kırılan bölgeleri incelenmiştir. Numunelerin kırık yüzeyleri, mikroskop altında yüksek çözünürlüklü görüntülemeye uygun hale getirilmek üzere önce 40 dakika boyunca altın-paladyum (Au-Pd) alaşımı ile vakum altında kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi, yüzeyin iletkenliğini artırarak yüksek kaliteli görüntü alınmasını sağlamıştır.

SEM görüntülemeleri, JEOL JSM-7001F model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın sağladığı yüksek büyütme oranları sayesinde hem kırık yüzey morfolojisi hem de nanoparçacıkların reçine matrisi içindeki dağılımı detaylı şekilde incelenmiştir. Yapılan analizlerde:

Kafes yapılarının kırık yüzeylerinde meydana gelen çatlak ilerleme yolları, boşluk oluşumları ve lif benzeri yapıların mikromekanik davranışları gözlemlenmiştir.

Nanoparçacık katkıların reçine matrisi içinde homojen ya da lokalize dağılım gösterip göstermediği belirlenmiş, bu durumun mekanik dayanım üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir.

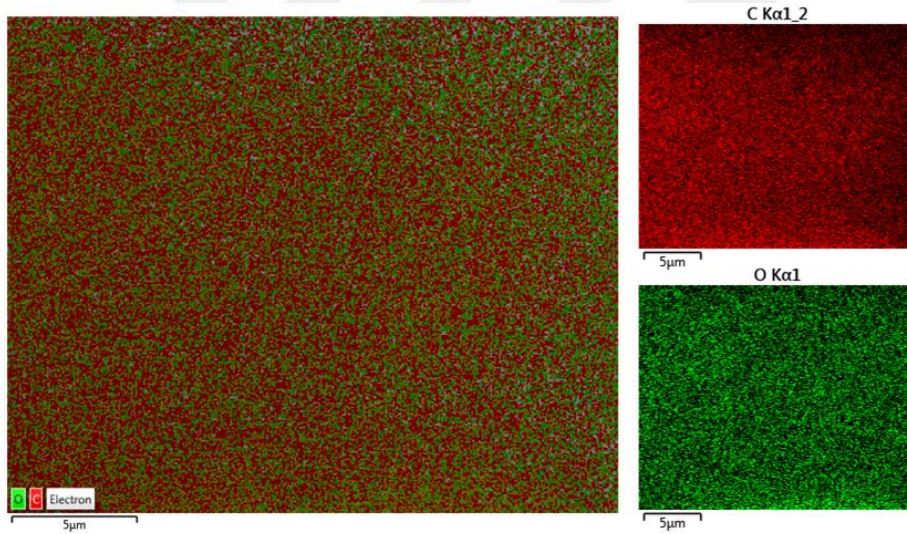
Görüntüler, farklı zoom oranlarında alınarak hem genel yapı hem de lokal mikro detaylar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca, SEM ile birlikte kullanılan Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS/EDX) sayesinde, kırık yüzeylerdeki nanoparçacıkların varlığı ve elementel bileşimi de tespit edilmiştir. Bu analizler, katkı malzemelerinin reçine matrisine entegrasyon düzeyini ve dağılım kalitesini ortaya koyarak, mekanik performansa olan katkılarının yorumlanmasına olanak tanımıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. EDX Analiz Sonuçları

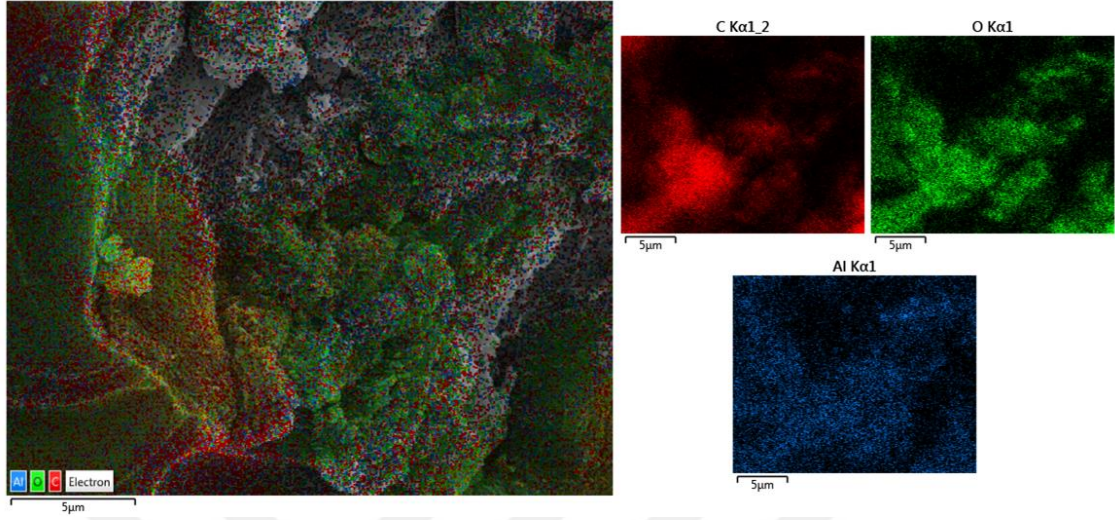
SEM-EDX haritalama sonuçları, katkısız ve nanopartikül katkılı UV reçine numunelerindeki element dağılımının ayrıntılı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 6.1’de herhangi bir nanopartikül katkı maddesi olmadan standart UV reçinesi kullanılarak üretilen PURE numunesi için SEM-EDX haritalama sonuçlarını sunmaktadır. Element dağılım haritası, kırmızıyla gösterilen karbon (C) ve yeşille gösterilen oksijenin (O) varlığını ortaya koymaktadır. Bu iki element, UV reçine matrisinin temel bileşenlerini temsil eder. Beklendiği gibi analiz, ek elementlere dair hiçbir iz olmaksızın, yapı boyunca tutarlı ve düzgün bir C ve O atom dağılımını doğrulamaktadır. Bu, numunenin katkı maddesi içermediği gerçeğini desteklemektedir. Karbonun varlığı reçine içindeki polimerik zincirlerden kaynaklanırken, oksijen reçine formülasyonundaki bağlayıcı ve kütleme maddeleriyle ilişkilidir.



Şekil 6.1 PURE numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi

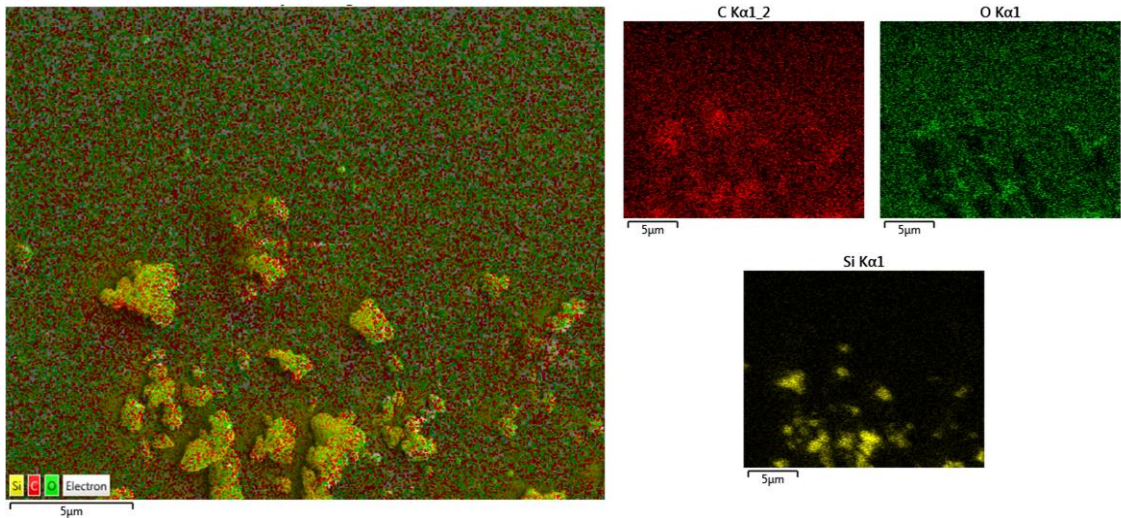
Şekil 6.2’de UV reçinesine alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartikülleri eklenerek üretilen numunenin element haritalamasını göstermektedir. Dağılım haritasında, karbon (C) kırmızı, oksijen (O) yeşil ve alüminyum (Al) mavi renkte görünmektedir. Haritalama, yapı boyunca alüminyum ve oksijenin oldukça eşit bir şekilde dağıldığını ortaya koyarak, Al_2O_3 partiküllerinin iyi dağıldığını göstermektedir. PURE numunesinde olduğu gibi karbonun varlığı reçinenin polimer omurgasına atfedilirken, alüminyum ve oksijen atomları eklenen nanopartiküllerle ilişkilidir. Daha da önemlisi, görünür yığılmanın

olmaması, partiküllerin hazırlama işlemi sırasında iyi karıştırıldığını ve katkı maddesinin reçine matrisine etkili bir şekilde entegre edildiğini göstermektedir. Herhangi bir yerel birikimin olmaması, yapının mekanik olarak daha kararlı olabileceğini göstermektedir.



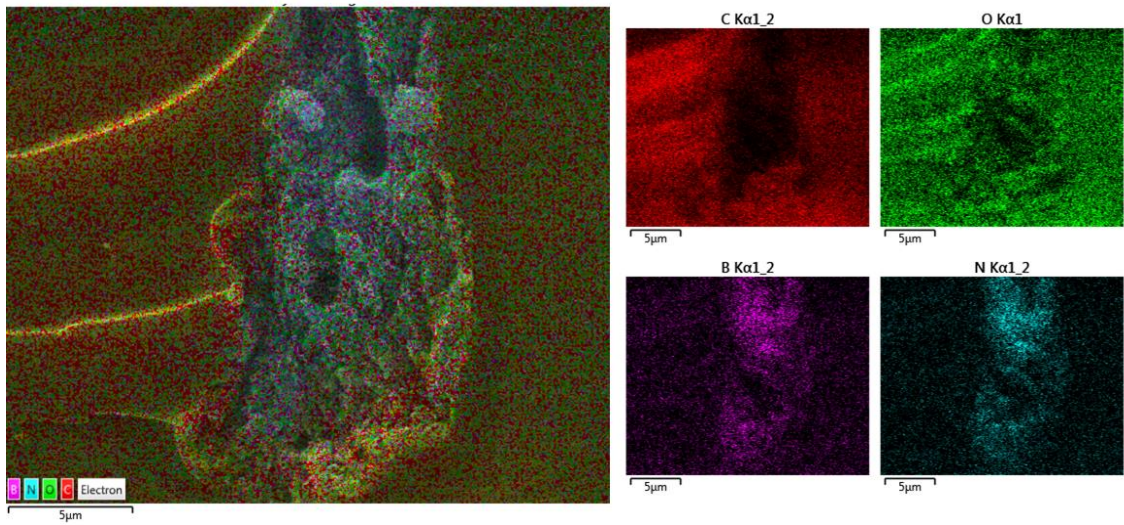
Şekil 6.2 Al_2O_3 numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi

Şekil 6.3'te silisyum karbür (SiC) nanopartikülleriyle güçlendirilmiş numune için SEM-EDX eşleme sonuçları sunulmaktadır. Burada, karbon (C) kırmızı, oksijen (O) yeşil ve silisyum (Si) sarı olarak gösterilmiştir. Önceki numunelerde olduğu gibi, reçinenin karbonu ve oksijeni matris boyunca eşit şekilde dağılmıştır. SiC katkı maddesinden kaynaklanan silisyum da haritalanan alan boyunca tespit edilmiştir. Dağılım nispeten homojen görünse de yoğunluktaki bazı ufak değişimler, yerel parçacık birikimlerinin varlığını düşündürmektedir. Bununla birlikte, Si elementinin genel homojenliği, karıştırma işleminin büyük ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3 SiC numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi

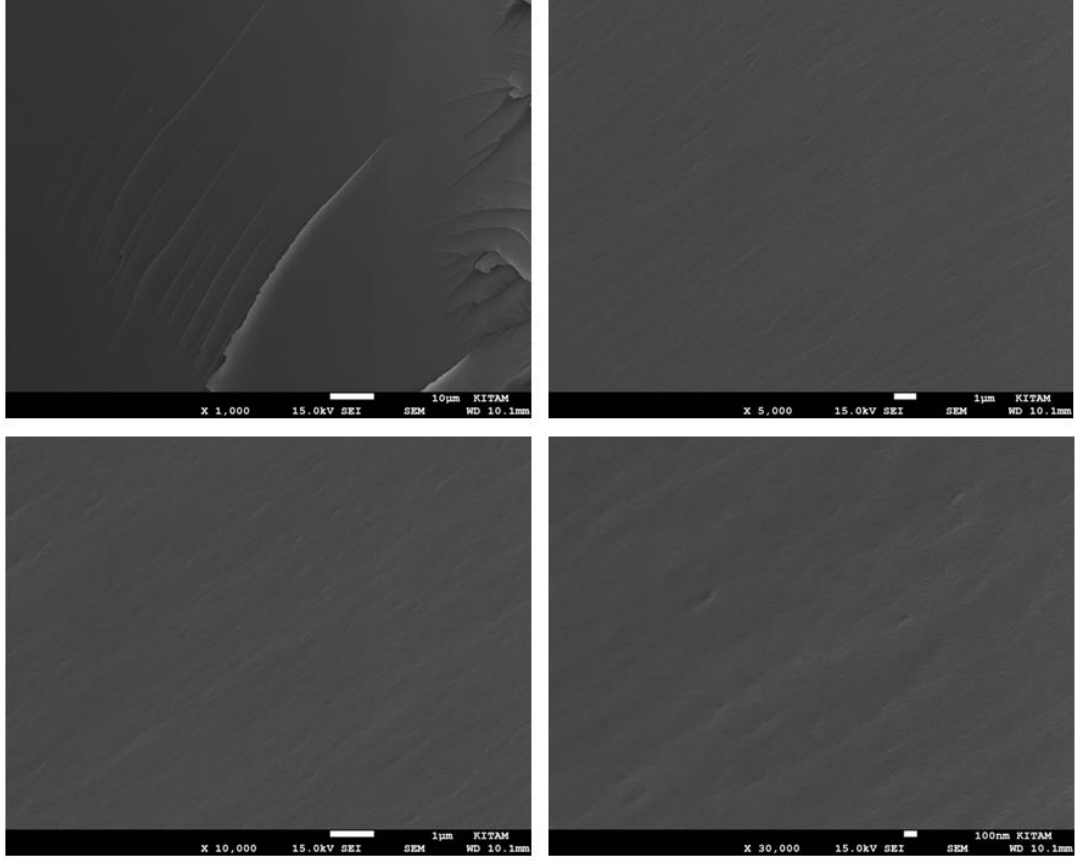
Şekil 6.4'te hekzagonal bor nitrür (hBN) nanopartikülleriyle modifiye edilmiş numunenin element haritalamasını göstermektedir. Bu şekilde, karbon (C) kırmızı, oksijen (O) yeşil, bor (B) mor ve azot (N) turkuaz renkte gösterilmiştir. UV reçinesine özgü olan karbon ve oksijen elementleri, yüzey boyunca eşit şekilde dağılmıştır. hBN katkısının temel elementlerini oluşturan bor ve azot numunenin tamamında tespit edilmiştir. Uzaysal dağılımları, hBN parçacıklarının makul bir düzgünlükle dağıldığını göstermektedir, ancak bazı lokal yoğunlaşmalar da görülebilmektedir. Bunlar hBN'nin pul benzeri yapısından veya katmanlar halinde yerleşme eğiliminden kaynaklanıyor olabilir (Tang vd., 2025). Buna rağmen genel dağılım reçine matrisine tatmin edici bir entegrasyonun sağlandığını göstermektedir.



Şekil 6.4 hBN numunesine ait SEM-EDX haritalama ile element dağılım analizi

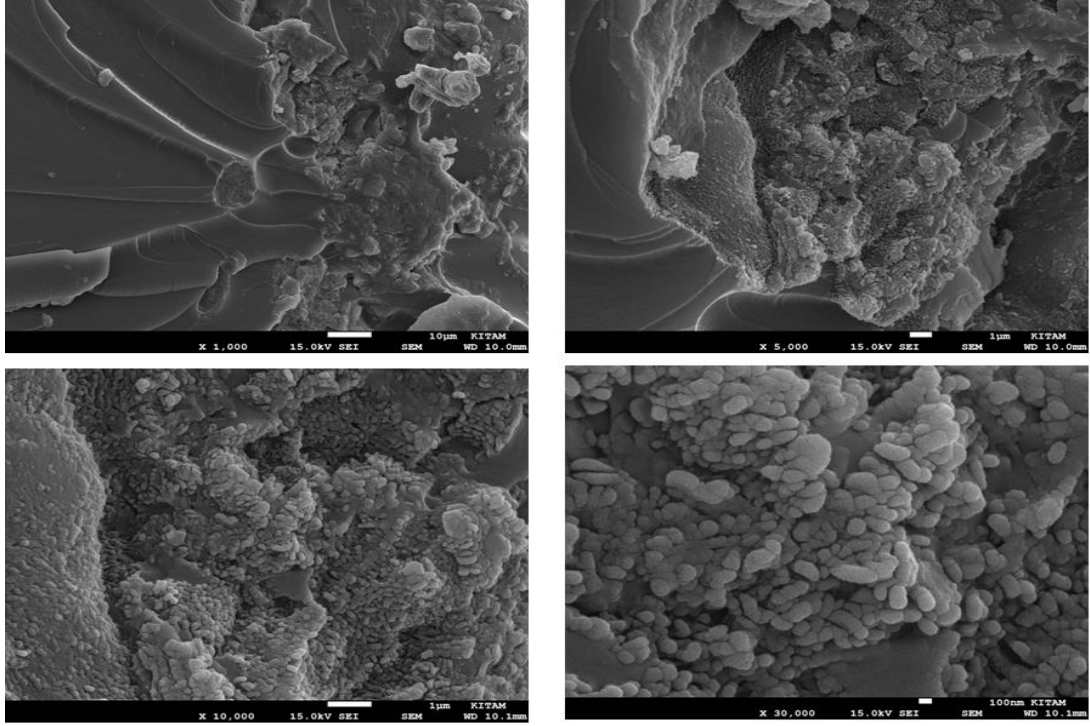
6.2. SEM Analiz Sonuçları

Şekil 6.5'te katkısız numunenin (PURE) kırık yüzeyinin SEM analizlerinin farklı büyütme görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi, katkısız numunede yüzey pürüzlülüğü minimum seviyede olup, kırılma alanı oldukça düzgün ve kusursuz bir yapı sergilemektedir. Bu yapı, polimer esaslı malzemenin tek başına yeterli mekanik bütünlüğü sağladığını göstermektedir.



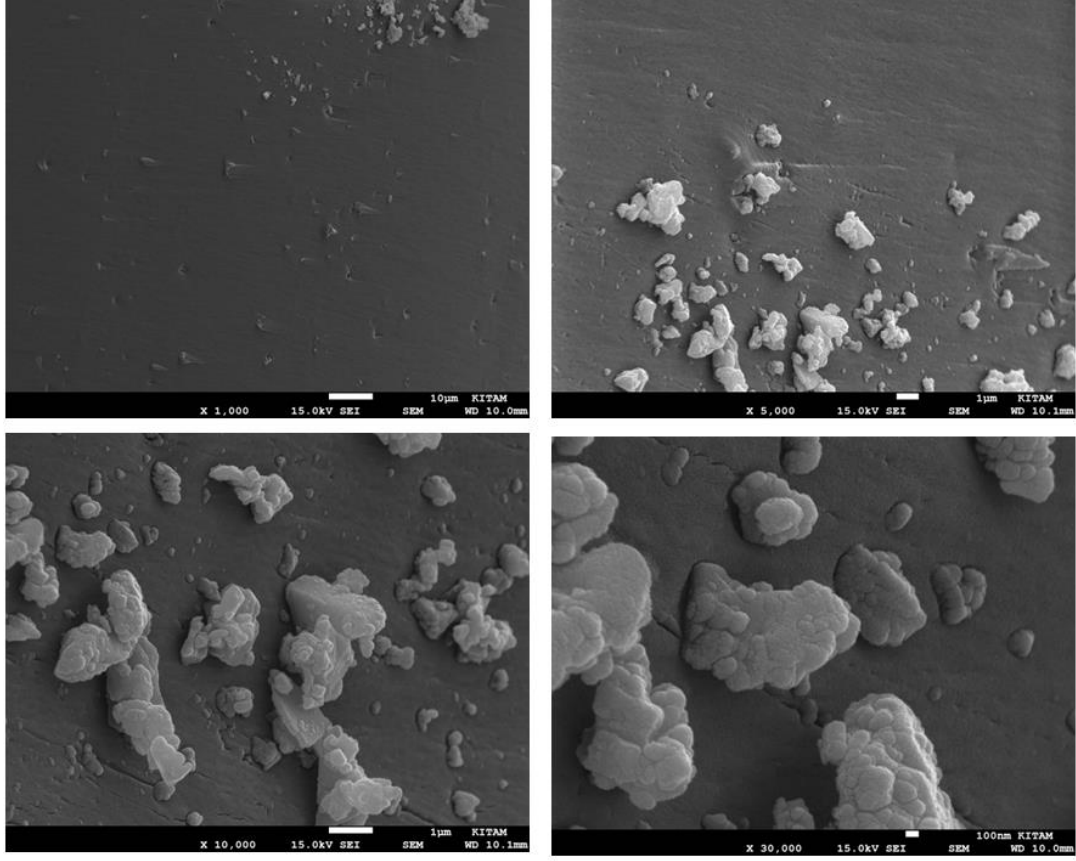
Şekil 6.5 Katkısız numuneye (PURE) ait SEM görüntüleri

Şekil 6.6'da standart UV reçine içerisine Alüminyum Oksit nanopartikül katkısı eklenerek üretilmiş Al_2O_3 numunesine ait farklı büyütmelelerdeki görüntüleri ve kırılma bölgesi detayları verilmiştir. Şekil 6.6'da Al_2O_3 katkılı numunedeki kırılma yüzeyinde dikkat çeken en önemli ayrıntılardan biri, bölgesel çatlak oluşumları ve bu çatlakların katkılı malzemenin düzensiz dağıldığı alanlarda yoğunlaşmasıdır. Bu durum, Al_2O_3 parçacıklarının yer yer kümелendiğini ve bu kümelerin çatlak ilerlemesini kolaylaştırdığını göstermektedir.



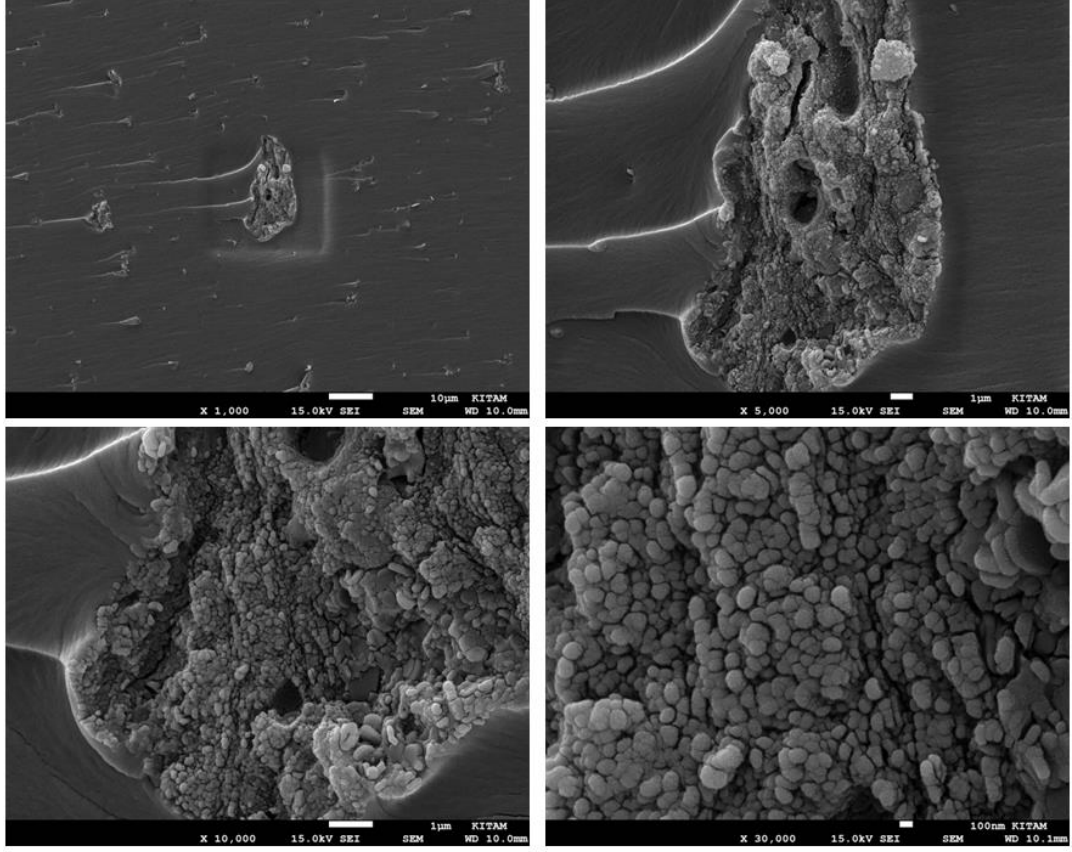
Şekil 6.6 Al₂O₃ numunesine ait SEM görüntüleri

Şekil 6.7’de standart UV reçine içerisine Silisyum Karbür nanopartikül katkısı eklenerek üretilmiş SiC numunesine ait farklı büyütmelelerdeki görüntüleri ve kırılma bölgesi detayları verilmiştir. SiC katkılı numunede daha girintili çıkıntılı, pürüzlü bir yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir. Partikül dağılımı çoğunlukla dengeli olmakla birlikte Şekil 6.7’de görüldüğü gibi bazı bölgelerde yoğunlaşmalar ve bu bölgelere bağlı doğrusal çatlak oluşumları tespit edilmiştir. Bu durum SiC katkısının yapının rijitliğini artırdığını ancak homojen bir şekilde karıştırılmadığında mekanik zayıflıklara da neden olabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.7 SiC numunesine ait SEM görüntüleri

Son olarak, hBN eklenmiş numunede (bkz. Şekil 6.8), kırık yüzeyi nispeten pürüzsüz, katmanlı ve oldukça düzenli bir yapıya sahiptir. Yapıya hBN katkısı hem morfolojik olarak hem de katkı maddesinin reçineyle uyumluluğu açısından olumlu bir etkiye sahiptir. Kırık yüzeyindeki pürüzsüzlük, bu katkı maddesinin yüksek karıştırılabilirlik ve bağlayıcı özelliklerini desteklemektedir. Buna ek olarak, hBN'nin kendine özgü yapısal özellikleri bu düzenli morfolojinin başlıca nedeni olarak düşünülebilir (Rao vd., 2023).



Şekil 6.8 hBN numunesine ait SEM görüntüleri

6.3. Mekanik Test Sonuçları

6.3.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme numuneleri, stereolitografi teknolojisi kullanılarak ASTM D638-14 standardına uygun olarak üretilmiştir. Dört farklı grup değerlendirilmiştir: saf reçine numunesi ve sırasıyla SiC, hBN ve Al₂O₃ nanopartikülleri içeren reçine kompozitleri. Çekme testlerinden elde edilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.9'da sunulmuştur. Test edilen numuneler arasında, hBN takviyeli kompozit 32,099 MPa'ya ulaşarak en yüksek çekme mukavemetini sergilemiştir. Al₂O₃ eklenmiş numune bunu yakından takip etmiştir. Takviyesiz (PURE) numune ile karşılaştırıldığında, SiC takviyeli numunenin çekme mukavemeti %2,79 daha düşükken, Al₂O₃ ve hBN takviyeli numuneler sırasıyla %16,57 ve %17,52 artış göstermiştir. Bu sonuçlar, özellikle hBN ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin dahil edilmesiyle çekme performansında önemli bir artış olduğunu göstermektedir.

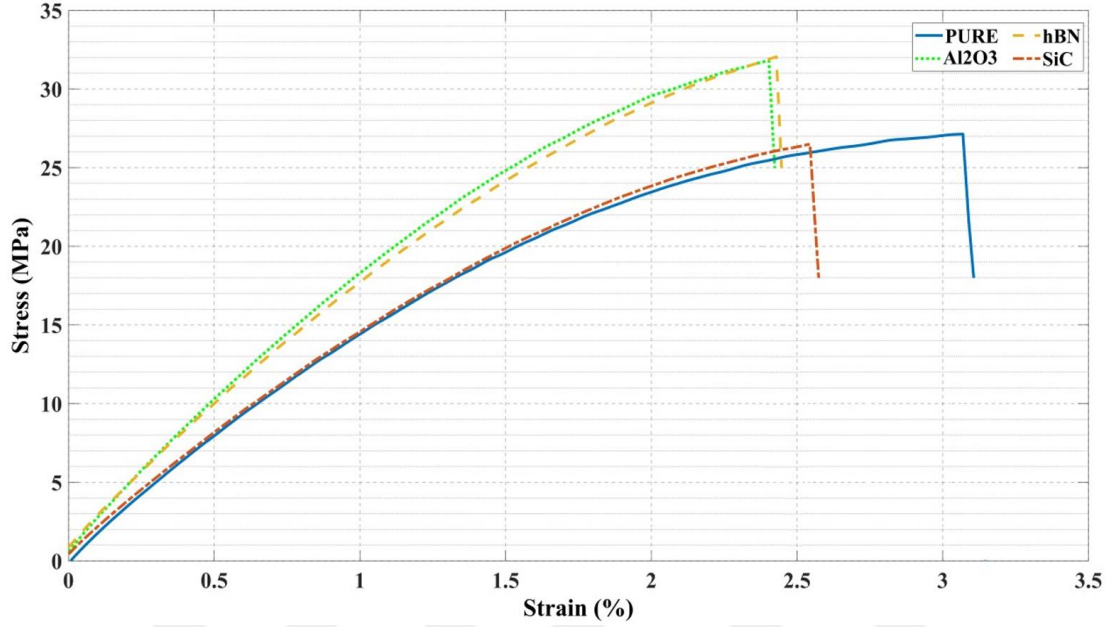
Gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri, çekme dayanımı, kopma gerinimi ve elastik modül dahil olmak üzere temel mekanik özellikleri belirlemek için kullanılmıştır. Çekme testi sonuçlarının tamamı Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Numunelerin mekanik özellikleri

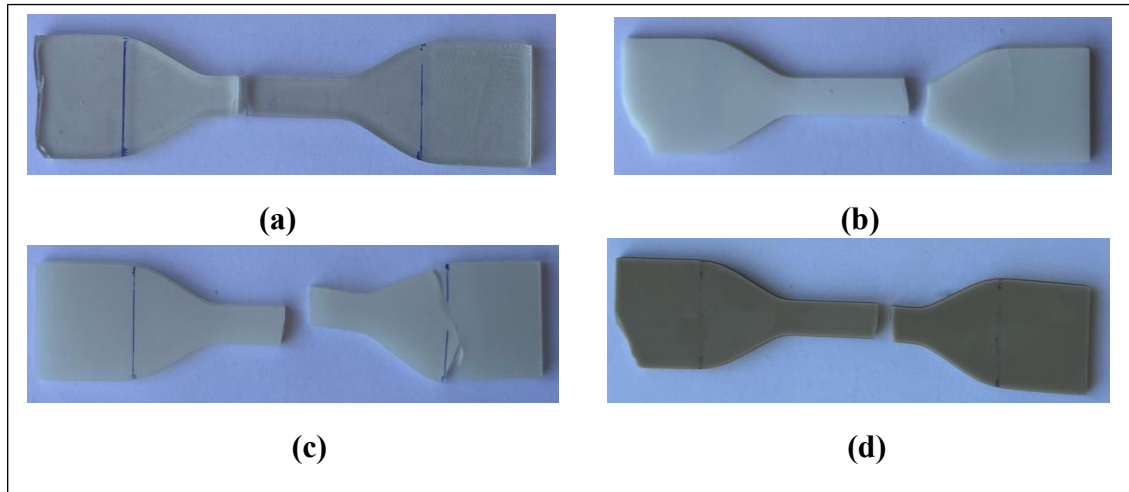
	Elastisite modülü, MPa	Maksimum çekme mukavemeti (σ_m), MPa	Şekil değiştirme (ϵ_k), %
PURE	1758,633	27,313	3,09
Al₂O₃	1955,312	31,839	2,42
SiC	1676,853	26,552	2,56
hBN	2117,284	32,099	2,44

Genel mekanik performans karşılaştırıldığında, hBN takviyeli numune en iyi performans gösteren malzeme olarak öne çıkmaktadır. Elastik modülü, PURE reçinesinden %20,39 daha yüksekti ve bu da daha sert ve daha rijit bir kompozit yapı olduğunu göstermektedir. Hem hBN hem de Al₂O₃ dolgu maddeleri, iyi entegre edilmiş ve güçlendirilmiş bir matris oluşumuna etkili bir şekilde katkıda bulunarak mekanik özellikleri geliştirmiştir. Öte yandan, SiC takviyeli numune, dolgusuz numune de dahil olmak üzere diğer tüm numunelerden daha düşük bir elastik modül göstermiştir. Elastisite modülü PURE'den %4,65 ve hBN'den %20,80 daha düşüktü, bu da SiC partiküllerinin reçine matrisi içinde zayıf dağılım veya zayıf arayüzey bağına sahip olabileceğini ve bunun da daha düşük mekanik performansa neden olduğunu düşündürmektedir. Süneklik açısından, PURE numunesi kopmada en yüksek gerinimi (%3,09) göstererek, nispeten daha sünek bir yapıya sahip olduğunu doğrulamıştır. Nanopartikül takviyeli numuneler karşılaştırılabilir gerinim değerleri göstermiştir, bu da partikül takviyesinin sertlik ve mukavemeti artırırken uzama kabiliyetini biraz azalttığını göstermektedir. Tüm numuneler başlangıçta doğrusal elastik bir davranış sergilemiş, ardından literatürdeki bulgularla tutarlı olarak, kırılmadan önce doğrusal olmayan bir deformasyon aşaması izlemiştir (Somdee vd., 2024).

Şekil 6.10'da sunulan çekme testi sonrası kırık yüzeylerin fraktografik analizi, ağırlıklı olarak gevrek kırılma özelliklerini ortaya koymuştur. Bu davranış UV reçinenin kendine özgü kırılma polimer yapısına bağlanabilir. Nanopartikül takviyeli numunelerin kırık yüzeyleri, daha düşük uzama değerleri ve plastik deformasyonu sınırlayan sert dolgu parçacıklarının varlığıyla uyumlu olarak parçalanmış kırılma belirtileri göstermiştir.



Şekil 6.9 Toz katkılı ve katkısız çekme numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.10 (a)Pure, (b)hBN nanopartikül katkılı, (c)Al₂O₃ nanopartikül katkılı, (d)SiC nanopartikül katkılı numunelerin çekme test numunelerinin kopma yüzeyleri

6.3.2. Basma Test Sonuçları

Hem saf UV reçinesi hem de nanopartiküllerle (Al_2O_3 , hBN ve SiC) güçlendirilmiş UV reçinesi kullanılarak üretilen 3D yazdırılmış kafes yapıların mekanik performansını değerlendirmek için yarı-statik tek eksenli sıkıştırma testleri gerçekleştirildi. Amaç hem kafes geometrisinin hem de nanopartikül tipinin basınç dayanımı ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Her bir konfigürasyon için ortaya çıkan gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.11'de sunulurken, karşılaştırmalı bir analiz Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Yükleme altında SC kafesinin kademeli deformasyon aşamaları Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Takviyesiz numuneler arasında (Şekil 6.11a), Basit Kübik (SC) yapı 0,2937 MPa'ya ulaşarak en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir. Ancak, kırılmanın en yüksek gerilme noktasından sonra aniden meydana gelmesi nedeniyle deformasyon davranışı gevrek nitelikte olmuştur. Buna karşılık, Elmas (DIA) yapısı daha düşük basınç dayanımı (0,1338 MPa) göstermiş, ancak yapısal çöküşten önce daha yüksek gerinimi sürdürerek sünek özellikler sergilemiştir. Oktahedral (OCT) yapı, mukavemet ve süneklik açısından orta düzeyde davranış sergilemiştir.

Al_2O_3 nanoparçacıklarının eklenmesiyle (Şekil 6.11b), basınç dayanımı değerleri tüm geometrilerde iyileşmiştir. SC kafesi 0,3501 MPa'ya ulaşarak, takviyesiz duruma kıyasla %19,20'lik bir artış göstermiştir. DIA ve OCT yapıları da sırasıyla 0,2698 MPa ve 0,2206 MPa basınç dayanımlarıyla önemli iyileşmeler göstermiştir. Özellikle DIA yapısının sünek kırılma modunu koruması, Al_2O_3 'nin hem mukavemete hem de deformasyon kapasitesine katkıda bulunduğunu göstermektedir.

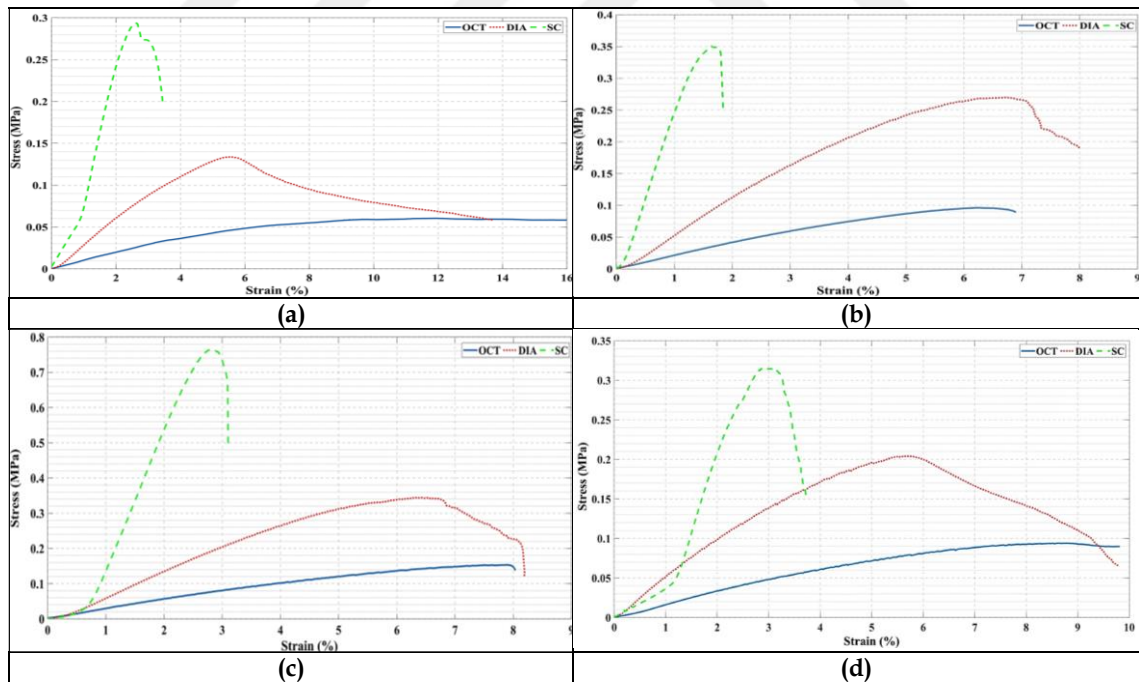
hBN ilavesi durumunda (Şekil 6.11c), tüm kafes tipleri basınç dayanımında dikkate değer iyileşmeler gösterdi. SC kafesi, 0,7634 MPa ile tüm konfigürasyonlar arasında en yüksek dayanım değerine ulaşmış ve takviyesiz haline kıyasla %159,92'lik bir artış göstermiştir. DIA ve OCT yapıları sırasıyla %157,10 ve %153,38'lik iyileştirmelere karşılık gelen 0,344 MPa ve 0,1911 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Ancak, uzamada belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu da artan mukavemet ile azalan süneklik arasında bir denge olduğunu göstermektedir.

SiC nanopartiküllerinin eklenmesi (Şekil 6.11d) basınç dayanımında orta düzeyde artışa neden olmuştur. SC kafesi 0,3148 MPa değerine ulaşarak %7,18'lik bir artış göstermiştir. DIA ve OCT yapıları 0,204 MPa ve 0,1876 MPa değerlerine ulaşarak sırasıyla %52,46 ve %55,53 oranında iyileşme göstermiştir. Her ne kadar mukavemet değerleri hBN veya

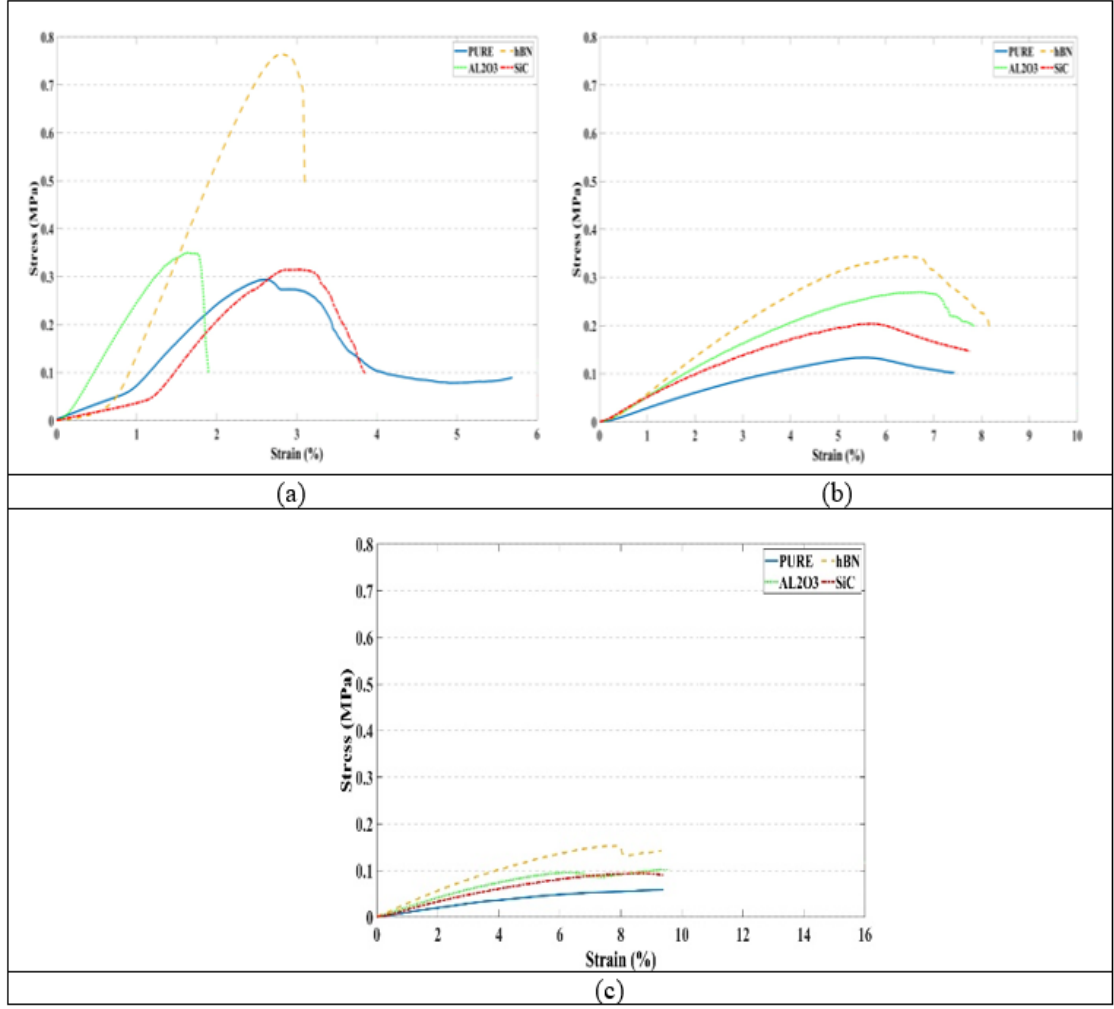
Al_2O_3 ile gözlenen değerlerden daha düşük olsa da süneklik özellikle DIA yapısında SiC takviyeli numunelerde daha iyi korunmuştur.

Şekil 6.12’de SC, DIA ve OCT yapıların hem güçlendirilmemiş hem de güçlendirilmiş koşullar için gerilme-şekil değiştirme davranışının doğrudan bir karşılaştırmasını sunmaktadır. SC yapısı en yüksek tepe dayanımını göstermesine rağmen, tüm takviye tiplerinde tutarlı bir şekilde gevrek davranış sergilemiştir. Buna karşılık, DIA yapıları orta düzeyde dayanımı artırılmış şekil değiştirme kabiliyetiyle birleştirerek dengeli bir performans sergilemiştir. OCT yapıları en düşük dayanımı göstermiştir ancak kırılmadan önceki uzamalarının daha yüksek olması nedeniyle nispeten daha fazla enerji emme kapasitesi göstermiştir.

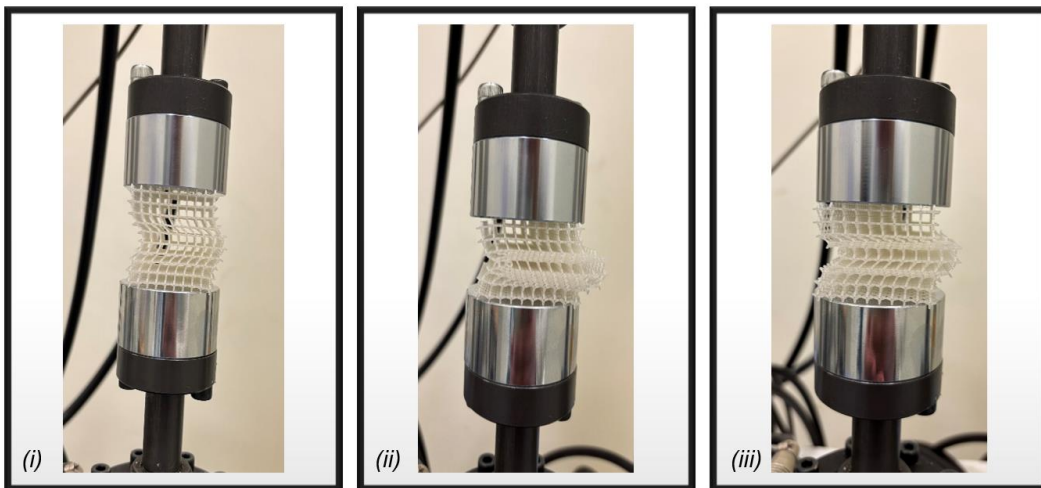
Şekil 6.13’te SC yapısının basınç yüklemesi altındaki kademeli hasar aşamalarını göstermektedir. Başlangıçta, tüm yapılar doğrusal elastik bir tepki göstermiş, ardından yerel çubuk burkulması ve çökme meydana gelmiştir. Gerilmedeki ani düşüşün, tek tek desteklerin gevrek kırılmasına bağlandığı, daha sonra oluşan küçük gerilme artışlarının ise kırık elemanların birbirine kenetlenmesi ve yoğunlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.11 (a) PURE kafes yapılarının, (b) Al_2O_3 tozlu kafes yapılarının, (c) hBN tozlu kafes yapılarının ve (d) SiC tozlu kafes yapılarının gerilme-şekil değiştirme grafikleri



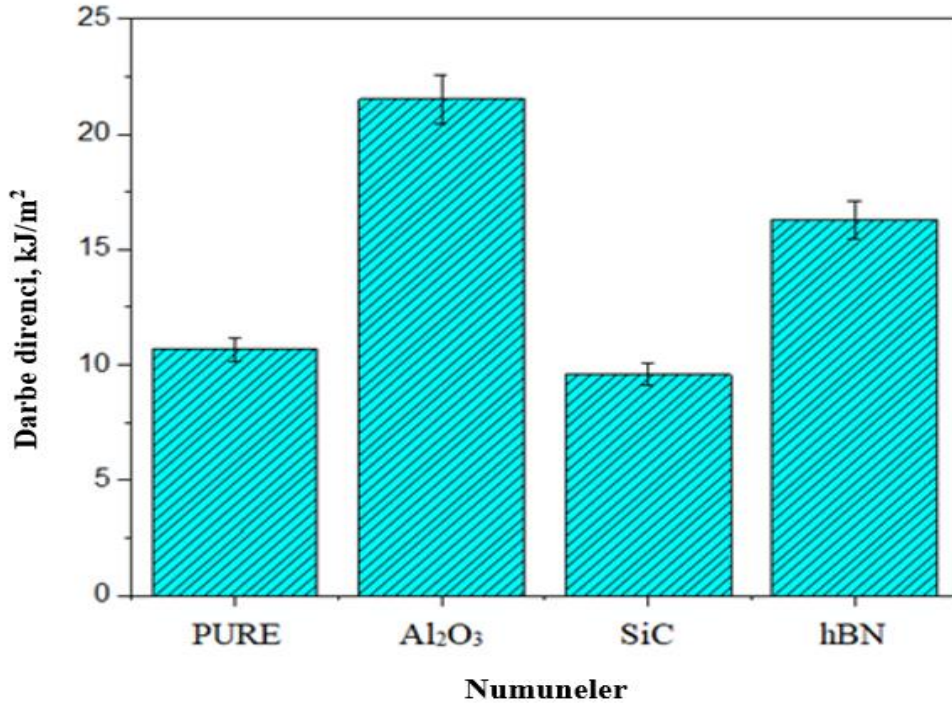
Şekil 6.12 (a)basit kübik, (b)elmas ve (c)oktahedral kafes yapılarının nanopartikül katkılı ve katkısız gerilme-şekil değiştirme grafikleri



Şekil 6.13 Basit kübik kafes yapısının tek eksenli basma testi aşamaları

6.3.3. Darbe Test Sonuçları

Hem nanopartikül içermeyen hem de nanopartikül takviyeli numunelerin Charpy darbe dayanımı değerleri Şekil 6.14'te sunulmaktadır. Test edilen gruplar arasında SiC nanopartikülleri ile takviye edilen numuneler $9,581 \text{ kJ/m}^2$ ile en düşük darbe dayanımını gösterirken, Al_2O_3 nanopartikülleri ile takviye edilenler $21,509 \text{ kJ/m}^2$ ile en yüksek değere ulaşmıştır. Takviyesiz reçineye kıyasla, Al_2O_3 nanopartiküllerinin eklenmesi darbe performansını önemli ölçüde artırırken, SiC nanopartiküllerinin eklenmesi toklukta gözle görülür bir azalmaya yol açmıştır. Al_2O_3 katkılı numunelerin SiC katkılı numunelere oranla %124,49 daha yüksek darbe direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, dinamik yükleme altında reçine esaslı kompozitlerin mekanik davranışını belirlemede nanopartikül tipinin önemli rolünü vurgulamaktadır. Bir malzemenin darbe dayanımı, malzemelerin atomik yapısı ve atomlar arası bağlarıyla yakından ilişkilidir. Özellikle nanokompozit sistemlerde darbe dayanımındaki azalma, genellikle polimer matris içerisindeki nanopartiküllerin aglomerasyonuna bağlanmaktadır. Bu tür bir kümelenme, darbe yüklemesi altında erken çatlak oluşumu ve ilerlemesini teşvik ederek gerilme yoğunlaştırıcısı görevi görebilir (Petousis vd., 2022). Bu bağlamda, Al_2O_3 nanopartiküllerinin sadece homojen dağılımları nedeniyle değil, aynı zamanda reçine matrisiyle güçlü kimyasal etkileşimleri ve bağlanma eğilimleri nedeniyle de darbe dayanımını artırdığı görülmektedir. Benzer şekilde, hBN takviyeli numuneler gelişmiş darbe dayanımı göstermiştir; bu durum, çatlak sapmasını veya dallanma mekanizmalarını teşvik ederek çatlak ilerlemesini engellediği bilinen hBN'nin katmanlı atomik yapısı ile açıklanabilir (Amirabadi vd., 2024; Zhuang vd., 2014). Öte yandan, SiC nanopartikülleri reçineyle nispeten zayıf bağlanma sergilemiş bu da darbe enerjisini emme kabiliyetlerini sınırlamış ve dolayısıyla kompozitin genel tokluğunu azaltmıştır.



Şekil 6.14 Nanopartikül katkılı ve katkısız numunelerin darbe dirençleri

6.4. Termal Analiz Sonuçları

6.4.1. TGA Analizi Sonuçları

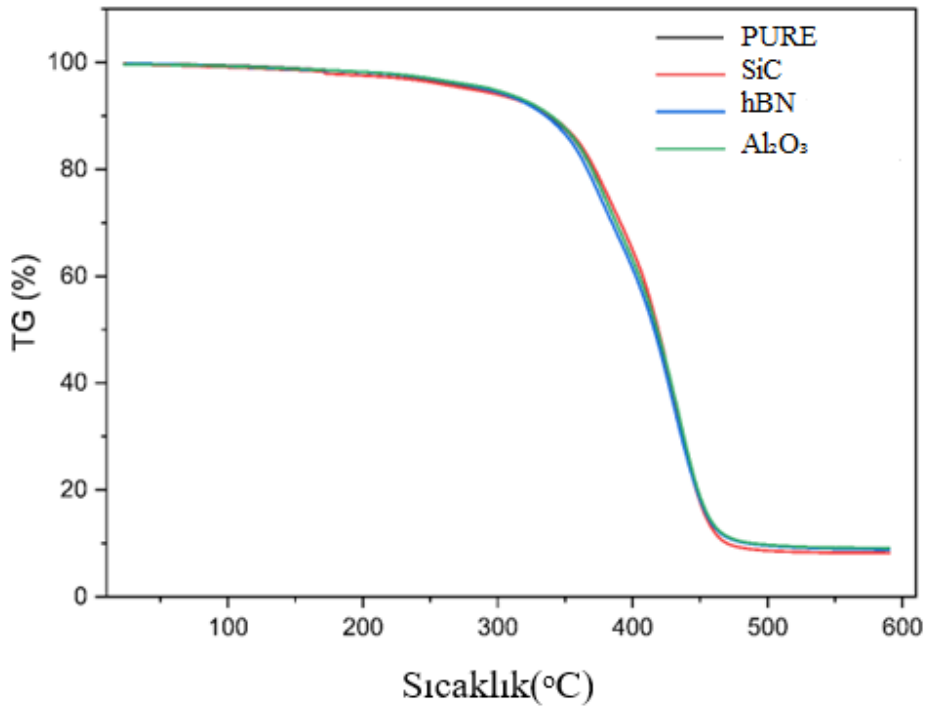
TGA, kontrollü bir atmosferde (nitrojen, oksijen, argon, hava vb.) artan sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak izotermal olarak bir malzemedeki ağırlık değişiminin miktarını ve oranını ölçmektedir. TG/DTG, doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin termal kararlılığını, bileşimlerini ve termal bozunma davranışına olan yapısal bağımlılıklarını analiz ederek karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan en hassas termal analiz yöntemlerinden biridir (Nurazzi vd., 2021).

Hem saf UV ile kürlenmiş reçinenin hem de farklı tipte nanopartiküllerle güçlendirilmiş reçine numunelerinin termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları Şekil 6.15'te sunulmaktadır. Grafikten de görüldüğü üzere, tüm numuneler başlangıç sıcaklık aralığında minimum ağırlık kaybı sergilemekte ve bu da düşük sıcaklıklarda iyi bir kararlılığa işaret etmektedir. Ana bozunma bölgesi, polimer matrisin ve organik bileşenlerin önemli termal ayrışmaya uğradığı 400°C ile 500°C arasında gözlenmektedir. Bu sıcaklık aralığında kütlede hızlı bir düşüş meydana gelir ve 500°C'den sonra artık kütle sabitleme eğilimi gösterir ve daha fazla bozulma göstermez.

Herhangi bir dolgu maddesi içermeyen numuneler ve hBN ve Al₂O₃ nanopartikülleri ile takviye edilen numuneler oldukça benzer termal kararlılık profilleri sergilemektedir.

Ancak SiC nanopartiküllerle takviye edilen numune diğerlerine kıyasla yaklaşık %11,75 oranında daha fazla kütle kaybı göstermektedir. Bu artan bozunma, SiC'nin kristal yapısı içindeki nispeten daha zayıf atomlar arası bağlara bağlanabilir; bu da daha belirgin termal ayrışmaya yol açar (Cai vd., 2024).

Genel olarak hem nanopartikül takviyeli hem de takviyesiz numuneler karşılaştırılabilir termal bozunma davranışları sergilemektedir, bu da bu dolgu maddelerinin eklenmesinin UV reçinesinin termal stabilitesini büyük ölçüde değiştirmedığını göstermektedir. Bununla birlikte, SiC katkısının stabiliteyi bir dereceye kadar olumsuz etkilediği görülürken, hBN ve Al₂O₃'ün ise termal maruziyet sırasında kompozitin bütünlüğünü koruduğu görülmektedir.



Şekil 6.15 Toz katkılı ve katkısız numunelerin TGA analiz sonuçları

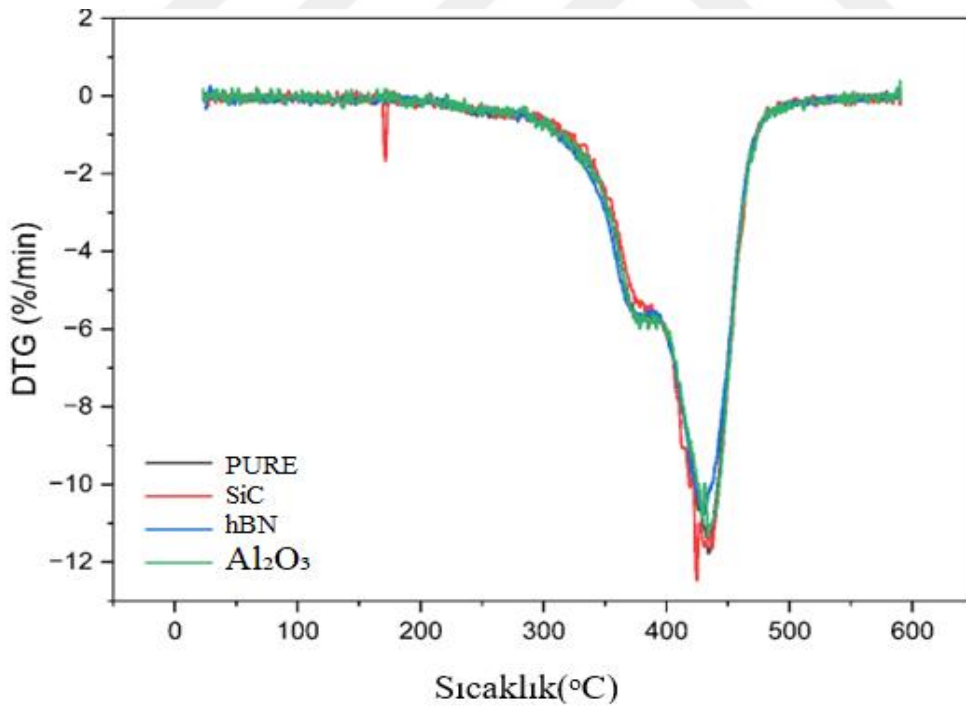
6.4.2. DTG Analizi Sonuçları

DTG, bir malzemenin sıcaklıkla birlikte ağırlık kaybını (veya ağırlık artışını) ölçen ve farklı organik malzemelerin kinetik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan basit bir analitik tekniktir (El-Sayed & Mostafa, 2014). Standart UV ile kürlenmiş reçinenin ve farklı nanopartiküllerle güçlendirilmiş varyantlarının türev termogravimetrik (DTG) analiz sonuçları Şekil 6.16'da verilmiştir. DTG eğrilerinin detaylı incelenmesi yapıldığında, tüm numunelerin yaklaşık 400-450°C sıcaklık aralığında birincil bozunma

tepe noktası gösterdiğini ortaya koymaktadır; bu aralık, maksimum kütle kaybı hızının olduğu bölgeye karşılık gelmektedir.

hBN ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin reçine matrisine dahil edilmesinin, termal ayrışma hızını azaltarak termal kararlılığı iyileştirdiği belirlenmiştir. Özellikle hBN takviyeli numuneler, takviyesiz reçineye kıyasla %10,66 daha düşük pik kütle kaybı hızı göstermiştir. Buna karşılık, SiC takviyeli numuneler diğer tüm numunelerden önemli ölçüde daha yüksek bir bozunma oranı sergilemiştir. SiC ile modifiye edilmiş numunenin pik ayrışma oranı, modifiye edilmemiş reçineden %22,71 ve hBN ile güçlendirilmiş numuneden %30,52 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bu bulgular, hBN ve Al₂O₃ nanoparçacıklarının bozunma hızını azaltarak ve termal direnci artırarak olumlu katkıda bulunurken, SiC'nin termal bozunmayı hızlandırarak zararlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu davranış, SiC yüzeyinde kimyasal olarak adsorbe edilmiş organik bileşiklerin veya safsızlıkların varlığına bağlanabilir; bunlar daha kolay ayrışabilir ve parçalanma sürecini yoğunlaştırabilir (Basavalingu vd., 2001). SiC takviyeli numunede 424°C civarında gözlenen belirgin bir ayrışma piki bu varsayımı desteklemektedir.



Şekil 6.16 Toz katkılı ve katkısız numunelerin DTG analiz sonuçları

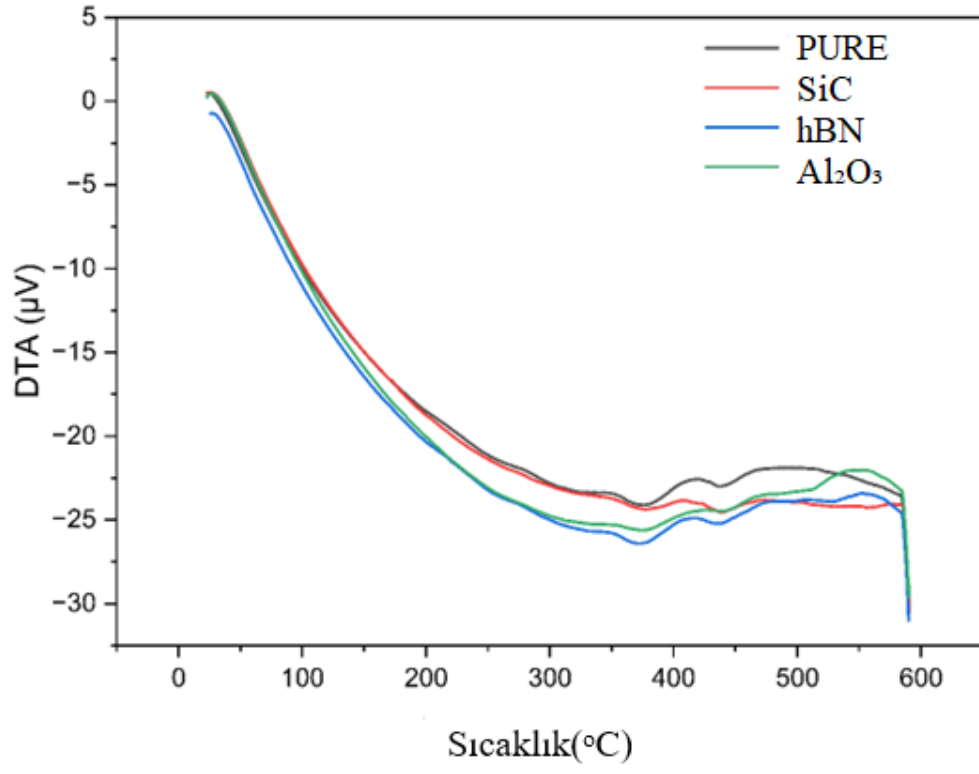
6.4.3. DTA Analizi Sonuçları

Diferansiyel termal analiz (DTA), ilk olarak Le Chatelier'nin termal geçişleri içeren analitik yöntemlerle yaptığı çalışmalarla başlamıştır. O zamandan beri DTA, seramik ve mineraloji alanlarında tanımlama ve analitik amaçlar için yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak, bu tekniğin polimerlerin incelenmesinde kullanılmaya başlanması seramiklere kıyasla daha yenidir (Keavney & Eberlin, 1960). Hem saf hem de nanopartikül takviyeli UV ile kürlenebilir reçine numuneleri için diferansiyel termal analiz (DTA) sonuçları Şekil 6.17'de gösterilmektedir. Termal tepki eğrilerinden de görüldüğü gibi, tüm numuneler nispeten benzer termal davranış sergilemiş olup, nanopartikül dolgu ve dolgusuz reçinelerin eğrileri birbirine oldukça yakındır. Sıcaklık arttıkça, DTA sinyalleri sürekli olarak düşme eğilimi göstererek, büyük olasılıkla nem buharlaşmasına ve reçine matrisi içinde hapsolmuş düşük molekül ağırlıklı uçucuların salınmasına karşılık gelen endotermik olayların meydana geldiğini göstermektedir.

350-450°C aralığında, tüm numunelerde iki farklı endotermik pik tespit edilmiştir. Bu pikler, zincir parçalanması ve yapısal bozulmanın termal davranışa hâkim olduğu polimer matrisindeki termal ayrışmanın başlangıcını yansıtmaktadır. Bu bölgedeki DTA sinyalinin devam eden düşüş eğilimi, aşamalı endotermik ayrışma reaksiyonlarının varlığını daha da desteklemektedir.

Test edilen katkı maddeleri arasında hBN, tüm sıcaklık aralığında en iyi termal olarak kararlı performansı göstermiştir. Bu durum, seramik benzeri hekzagonal yapısı ve yüksek sıcaklıklara karşı doğal direnci sayesinde, daha düzgün ve kontrollü bir termal bozunma sürecine katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır (Kostoglou vd., 2015; J. Zhou vd., 2024). Hem SiC hem de Al₂O₃ katkılı numunelerin benzer DTA profilleri sergileyerek orta düzeyde termal kararlılık göstermiştir. Buna karşılık, modifiye edilmemiş reçine, muhtemelen polimer zincirlerinin parçalanması ve inorganik kalıntıların yanması nedeniyle daha dalgalı bir termal model sergilemiştir (N. Singh vd., 2019).

Bu gözlemler, hBN gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı dolgu maddelerinin UV ile kürlenen reçinelere entegre edilmesinin, termal kararlılığı etkili bir şekilde artırabileceğini ve yüksek sıcaklıklarda ayrışmanın başlamasını geciktirebileceğini göstermektedir.



Şekil 6.17 Toz katkılı ve katkısız numunelerin DTA analiz sonuçları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, seramik nanoparçacık takviyesi ile kafes geometrisinin birlikte, SLA ile üretilmiş yapıların mekanik ve termal davranışlarını nasıl etkilediğine dair kapsamlı bir bakış sunmaktadır. UV ile kürlenebilen bir reçine matrisine Al_2O_3 , hBN ve SiC nanopartiküllerini dahil ederek ve üç farklı kafes tasarımı kullanarak yapılan araştırma, malzeme-yapı sinerjisinin performans sonuçlarını tanımlamada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Test edilen nanopartiküller arasında hBN, yüksek en-boy oranı ve katmanlı kristal yapısı nedeniyle hem çekme dayanımını hem de termal kararlılığı iyileştirerek üstün takviye kabiliyeti gösterdi. Al_2O_3 aynı zamanda sertliği ve darbe direncini de artırdı, ancak SiC'nin polimer matris içindeki daha zayıf bağlanma nedeniyle sınırlı faydalar gösterdi. Yapısal olarak, basit kübik kafesler en yüksek basınç dayanımını sunarken, elmas kafesler dayanım ve süneklik arasında istenen dengeyi sağladı. Oktahedral geometriler, mekanik açıdan daha az dayanıklı olmalarına rağmen, darbe senaryolarında daha iyi enerji emilim davranışı sergilediler.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde PURE numunesine kıyasla elastisite modülü ve maksimum çekme mukavemeti Al_2O_3 ve hBN katkıları ile artarken SiC katkısı ile düşmektedir. Uzama açısından bakıldığında ise PURE numunesine göre bütün katkıların uzamayı azalttığı görülmektedir. Sonuç olarak, hBN ve Al_2O_3 nanopartiküllerinin matris sistemiyle sinerjik etkileşimi, kompozit malzemenin yapısal bütünlüğünü güçlendirerek üstün mekanik özelliklerin elde edilmesine olanak tanımıştır.

Darbe testi sonuçlarına baktığımızda da benzer bir tablo karşımıza çıkmaktadır. En yüksek darbe direnci Al_2O_3 katkısı ile elde edilmiştir ve değeri $21,509 \text{ kJ/m}^2$ 'dir. hBN katkısı da Al_2O_3 kadar olmasa da darbe direncini PURE numunesine göre %52,70 oranında arttırmıştır ancak SiC katkılı numune darbe direncini PURE numunesine göre %10,12 oranında düşürmüştür.

Basma test sonuçlarına göre SC yapısında bütün nanopartikül ilavelerinde en yüksek dayanımı göstermesine rağmen gevrek davranış sergilemiştir. DIA yapıları ise SC'den daha düşük dayanım göstermesine karşın şekil değiştirme kabiliyetini de göz önünde bulundurulduğunda dengeli bir performans sergilemiştir. OCT yapıları ise en düşük dayanımı göstermiş ancak kırılmadan önceki uzamalarının daha yüksek olması nedeniyle nispeten daha fazla enerji emme kapasitesi göstermiştir.

Termal analiz, özellikle hBN olmak üzere seramik katkı maddelerinin bozunmanın başlamasını geciktirdiğini ve termal ayrışma hızını azalttığını, böylece kompozitlerin termal güvenilirliğini artırdığını doğrulamıştır. SEM ve SEM-EDX gözlemleri bu bulguları daha da destekleyerek dolgu maddesi dağılım homojenliği ile mekanik bütünlük arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın başlıca sınırlılıkları arasında, kullanılan nanopartiküllerin boyutsal olarak özdeş olmaması, farklı sentez yöntemlerinden kaynaklanan şekilsel varyasyonlar ve farklı safsızlıklar yer almaktadır. Buna ek olarak, yalnızca üç farklı kafes yapısının değerlendirilmesi, doluluk oranının sabit tutulması ve nanopartikül katkı miktarının ağırlıkça sabit bir oranda belirlenmiş olması, çalışmanın kapsamını sınırlayan diğer etmenler arasında değerlendirilmektedir.

Bu umut verici sonuçlara rağmen, çalışma sabit bir nanopartikül konsantrasyonu ve üç kafes topolojisi ile sınırlıdır. Parçacık morfolojisi, yüzey fonksiyonelleştirmesi ve SLA baskı sürecinin neden olduğu anizotropik davranış gibi faktörler ele alınmamıştır ancak gerçek dünya performansında önemli roller oynayabilir. Bu nedenle gelecekteki araştırmalar, kompozit davranışı hakkında daha sağlam bir anlayış oluşturmak için farklı dolgu yüklerini, partikül yüzey işlemlerinin etkilerini ve uzun süreli çevresel yaşlanmayı araştırmalıdır. Ayrıca, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin ve çok malzemeli SLA süreçlerinin entegre edilmesi, karmaşık ve yüksek talep gören uygulamalarda kafes performansını uyarlamak için yeni yollar açabilir.

Genel olarak, sonuçlar dikkatle tasarlanmış nano dolgu malzemeleri ile geometrik tasarım kombinasyonlarının, yapısal, havacılık ve enerji dağıtıcı sistemlerde önemli potansiyele sahip yüksek performanslı, hafif ve termal olarak dayanıklı bileşenler üretmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W. & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(2). <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- Ahn, D.-G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 703-742. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00401-z>
- Aktitiz, İ., Aydın, K. & Topcu, A. (2020). Stereolitografi (SLA) tekniği ile basılan 3 boyutlu polimer yapılarda ikincil kütleme süresinin mekanik özelliklere etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949-958. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.868895>
- Aktitiz, İ., Aydın, K. & Topçu, A. (2021). Characterization of TiO₂ nanoparticle-reinforced polymer nanocomposite materials printed by stereolithography method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 4975-4980. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05574-x>
- Al-Ketan, O., Lee, D.-W., Rowshan, R. & Al-Rub, R. K. A. (2020). Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 102, 103520. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103520>
- Altıparmak, S. C. & Daminabo, S. I. C. (2024). Suitability analysis for extrusion-based additive manufacturing process. *Additive Manufacturing Frontiers*, 3(1), 200106. <https://doi.org/10.1016/j.amf.2023.200106>
- Amirabadi, S., Kheradmandkeysomi, M., Zandieh, A., Serles, P., Tanguy, N., Filleter, T., Sain, M. & Park, C. B. (2024). Highly tough and flame retardant polystyrene composites by elastomeric nanofibers and hexagonal boron nitride. *Journal of Materials Science & Technology*, 198, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.01.081>
- Andrew, J. J., Schneider, J., Ubaid, J., Velmurugan, R., Gupta, N. K. & Kumar, S. (2021). Energy absorption characteristics of additively manufactured plate-lattices under low-velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103768>
- Andrew, J. J., Ubaid, J., Hafeez, F., Schiffer, A. & Kumar, S. (2019). Impact performance enhancement of honeycombs through additive manufacturing-enabled geometrical tailoring. *International Journal of Impact Engineering*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103360>
- Arslanca, Y. (2024). *Predicting Mechanical Behaviour Of Auxetic Lattice Structures Using Finite Element Analysis and Machine Learning*. Middle East Technical University, Master of Science.
- Bagheri, A. & Jin, J. (2019). Photopolymerization in 3D printing. *ACS Applied Polymer Materials*, 1(4), 593-611.
- Bao, Y. (2022). Recent trends in advanced photoinitiators for vat photopolymerization 3D printing. *Macromolecular rapid communications*, 43(14), 2200202. <https://doi.org/10.1002/marc.202200202>
- Bardakçı, Y. S., Kayacan, C. & Gürgen, M. (2022). Metal Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat Makine Tasarımı ve İmalatı. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 5(1), 45-53.

- Basavalingu, B., Moreno, J. M. C., Byrappa, K., Gogotsi, Y. G. & Yoshimura, M. (2001). Decomposition of silicon carbide in the presence of organic compounds under hydrothermal conditions. *Carbon*, 39(11), 1763-1766.
- Bogusz, P., Popławski, A., Stankiewicz, M. & Kowalski, B. (2022). Experimental research of selected lattice structures developed with 3D printing technology. *Materials*, 15(1), 378. <https://doi.org/10.3390/ma15010378>
- Borikar, G. P., Patil, A. R. & Kolekar, S. B. (2023). Additively manufactured lattice structures and materials: Present progress and future scope. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(11), 2133-2180. <https://doi.org/10.1007/s12541-023-00848-x>
- Bove, A., Calignano, F., Galati, M. & Iuliano, L. (2022). Photopolymerization of ceramic resins by stereolithography process: a review. *Applied Sciences*, 12(7), 3591. <https://doi.org/10.3390/app12073591>
- Braconnier, D. J., Jensen, R. E. & Peterson, A. M. (2020). Processing parameter correlations in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 31, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100924>
- Brighenti, R., Marsavina, L., Marghitas, M. P., Montanari, M., Spagnoli, A. & Tatar, F. (2023). The effect of process parameters on mechanical characteristics of specimens obtained via DLP additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*, 78, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.092>
- Cai, Z., Yuan, X., Xu, C., Li, Y., Shao, Z., Li, W., Xu, J. & Zhang, Q. (2024). Grain boundary effects on chemical disorders and amorphization-induced swelling in 3C-SiC under high-temperature irradiation: From atomic simulation insight. *Journal of the European Ceramic Society*, 44(12), 6911-6925. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.04.064>
- Chen, F., Wu, Y.-R., Wu, J.-M., Zhu, H., Chen, S., Hua, S.-B., He, Z.-X., Liu, C.-Y., Xiao, J. & Shi, Y.-S. (2021). Preparation and characterization of ZrO₂-Al₂O₃ bioceramics by stereolithography technology for dental restorations. *Additive Manufacturing*, 44, 102055. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102055>
- Chockalingam, K., Jawahar, N. & Chandrasekhar, U. (2006). Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 12(2), 106-113.
- Dar, U. A., Mian, H. H., Abid, M., Topa, A., Sheikh, M. Z. & Bilal, M. (2020). Experimental and numerical investigation of compressive behavior of lattice structures manufactured through projection micro stereolithography. *Materials Today Communications*, 25, 101563. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101563>
- Dean, D., Wallace, J., Siblani, A., Wang, M. O., Kim, K., Mikos, A. G. & Fisher, J. P. (2012). Continuous digital light processing (cDLP): Highly accurate additive manufacturing of tissue engineered bone scaffolds. *Virtual and physical prototyping*, 7(1), 13-24. <https://doi.org/10.1080/17452759.2012.673152>
- Deckard, C. R., Beaman, J. J. & Darrah, J. F. (1992). *Method for selective laser sintering with layerwise cross-scanning*. Google Patents.
- Del Guercio, G., Galati, M., Saboori, A., Fino, P. & Iuliano, L. (2020). Microstructure and mechanical performance of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured via electron beam melting (EBM): a review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33, 183-203. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-00998-1>

- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U. & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Ding, G., He, R., Zhang, K., Xie, C., Wang, M., Yang, Y. & Fang, D. (2019). Stereolithography-based additive manufacturing of gray-colored SiC ceramic green body. *Journal of the American Ceramic Society*, 102(12), 7198-7209.
- Doodi, R. & Gunji, B. M. (2024). An experimental and numerical investigation on the performance of novel hybrid bio-inspired 3D printed lattice structures for stiffness and energy absorption applications. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(17), 3970-3979. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2188324>
- Dubey, D., Singh, S. P. & Behera, B. K. (2024). A review on recent advancements in additive manufacturing techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/09544089241275860>
- Dzogbewu, T. C. & de Beer, D. (2023). Powder bed fusion of multimaterials. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 15. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010015>
- Echeta, I., Dutton, B., Leach, R. K. & Piano, S. (2021). Finite element modelling of defects in additively manufactured strut-based lattice structures. *Additive Manufacturing*, 47, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102301>
- Echeta, I., Feng, X., Dutton, B., Leach, R. & Piano, S. (2020). Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 2649-2668. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04753-4>
- Elkaseer, A., Chen, K. J., Janhsen, J. C., Refle, O., Hagenmeyer, V. & Scholz, S. G. (2022). Material jetting for advanced applications: A state-of-the-art review, gaps and future directions. *Additive manufacturing*, 60, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103270>
- El-Sayed, S. A. & Mostafa, M. E. (2014). Pyrolysis characteristics and kinetic parameters determination of biomass fuel powders by differential thermal gravimetric analysis (TGA/DTG). *Energy conversion and management*, 85, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.068>
- Feng, J., Fu, J., Yao, X. & He, Y. (2022). Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>
- Galati, M. & Iuliano, L. (2018). A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive Manufacturing*, 19, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.001>
- Gao, B., Zhao, H., Peng, L. & Sun, Z. (2022). A review of research progress in selective laser melting (SLM). *Micromachines*, 14(1), 57. <https://doi.org/10.3390/mi14010057>
- Ge, Q., Li, Z., Wang, Z., Kowsari, K., Zhang, W., He, X., Zhou, J. & Fang, N. X. (2020). Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(2), 022004. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab8d9a>
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. & Khorasani, M. (2021). Sheet lamination. *Additive manufacturing technologies*, 253-283.

- Gök, D. A., Kılıçtek, S., Gök, S. & Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 517-537. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1251130>
- Gujba, A. K. & Medraj, M. (2020). Power ultrasonic additive manufacturing: process parameters, microstructure, and mechanical properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 1064870. <https://doi.org/10.1155/2020/1064870>
- Gülcan, O., Günaydın, K. & Tamer, A. (2021). The state of the art of material jetting—a critical review. *Polymers*, 13(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>
- Helou, M. & Kara, S. (2018). Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(3), 243-261. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1407456>
- Herbert, A. J. (1982). Solid object generation. *Jour Appl Photo Eng*, 185-188.
- Hu, K., Wang, H., Lu, K., Feng, Q., Yang, D., Cao, J., Zhang, B., Lü, Z. & Ran, X. (2022). Fabrication of silica-based ceramic cores with internal lattice structures by stereolithography. *China Foundry*, 19(5), 369-379. <https://doi.org/10.1007/s41230-022-2048-4>
- Huang, J., Qin, Q. & Wang, J. (2020). A review of stereolithography: Processes and systems. *Processes*, 8(9), 1138. <https://doi.org/10.3390/pr8091138>
- Hull, C. W. (1986). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. Google Patents.
- Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y. & Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2413-2435. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3>
- Kang, J.-H., Sakthiabirami, K., Jang, K.-J., Jang, J.-G., Oh, G.-J., Park, C., Fisher, J. G. & Park, S.-W. (2022). Mechanical and biological evaluation of lattice structured hydroxyapatite scaffolds produced via stereolithography additive manufacturing. *Materials & Design*, 214, 110372. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110372>
- Karagöz, İ., Bekdemir, A. D. & Tuna, Ö. (2021). 3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(4), 1186-1213. <https://doi.org/10.29130/dubited.877423>
- Kazemi, M. & Rahimi, A. (2018). Stereolithography process optimization for tensile strength improvement of products. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 688-697.
- Keavney, J. J. & Eberlin, E. C. (1960). The determination of glass transition temperatures by differential thermal analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 3(7), 47-53. <https://doi.org/10.1002/app.1960.070030706>
- Keshavarzan, M., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M. & Ravari, M. R. K. (2020). Investigation on the failure mechanism of triply periodic minimal surface cellular structures fabricated by Vat photopolymerization additive manufacturing under compressive loadings. *Mechanics of Materials*, 140, 103150. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103150>
- Kolamroudi, M. K., Asmael, M., Ilkan, M. & Kordani, N. (2021). Developments on electron beam melting (EBM) of Ti-6Al-4V: a review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 783-790. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02230-9>
- Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Robak, G., Moj, K., Krolczyk, G. M. & Kuntoğlu, M. (2022). Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on

- properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 81, 1040-1063. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.051>
- Kostoglou, N., Polychronopoulou, K. & Rebholz, C. (2015). *Rapid communication: Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets*. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.11.009>
- Li, D. (2021). A review of microstructure evolution during ultrasonic additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06439-8>
- Li, J., Boyer, C. & Zhang, X. (2022). 3D printing based on photopolymerization and photocatalysts: review and prospect. *Macromolecular Materials and Engineering*, 307(8), 2200010. <https://doi.org/10.1002/mame.202200010>
- Ling, C., Cernicchi, A., Gilchrist, M. D. & Cardiff, P. (2019). Mechanical behaviour of additively-manufactured polymeric octet-truss lattice structures under quasi-static and dynamic compressive loading. *Materials & Design*, 162, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.035>
- Liu, P., Sun, B., Liu, J. & Lu, L. (2022). Parametric shell lattice with tailored mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 60, 103258. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103258>
- Lu, J., Wang, D., Zhang, K., Li, S., Zhang, B., Zhang, X., Zhang, L., Wang, W., Li, Y. & He, R. (2022). Mechanical properties of Al₂O₃ and Al₂O₃/Al with Gyroid structure obtained by stereolithographic additive manufacturing and melt infiltration. *Ceramics International*, 48(16), 23051-23060. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.283>
- Lupone, F., Padovano, E., Casamento, F. & Badini, C. (2021). Process phenomena and material properties in selective laser sintering of polymers: A review. *Materials*, 15(1), 183. <https://doi.org/10.3390/ma15010183>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>
- Malekan, M. & Sigurjónsson, B. (2024). On the mechanical behavior of polymeric lattice structures fabricated by stereolithography 3D printing. *Engineering Reports*, e13003. <https://doi.org/10.1002/eng2.13003>
- Mamatha, S., Biswas, P. & Johnson, R. (2023). Digital light processing of ceramics: An overview on process, materials and challenges. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(5), 1083-1102. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00379-3>
- Maranha, J., Nascimento, P. J., Calcerano, T. A., Silva, C., Mueller, S. & Moniz, S. (2023). A decision-support framework for selecting additive manufacturing technologies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 34(7), 1279-1311.
- Mehrpouya, M., Tuma, D., Vaneker, T., Afrasiabi, M., Bambach, M. & Gibson, I. (2022). Multimaterial powder bed fusion techniques. *Rapid prototyping journal*, 28(11), 1-19.
- Mei, H., Zhao, R., Xia, Y., Du, J., Wang, X. & Cheng, L. (2019). Ultrahigh strength printed ceramic lattices. *Journal of Alloys and Compounds*, 797, 786-796.
- Melchels, F. P. W., Feijen, J. & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.

- Mele, M., Campana, G. & D'Avino, G. (2020). Life cycle impact assessment of desktop stereolithography. *Journal of cleaner production*, 244, 118743.
- Mirzababaei, S. & Pasebani, S. (2019). A review on binder jet additive manufacturing of 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 82.
- Moniruzzaman, M., O'Neal, C., Bhuiyan, A. & Egan, P. F. (2020). Design and Mechanical Testing of 3D Printed Hierarchical Lattices Using Biocompatible Stereolithography. *Designs*, 4(3), 22.
- Nagesha, B. K., Dhinakaran, V., Shree, M. V., Kumar, K. P. M., Chalawadi, D. & Sathish, T. (2020). Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 21, 916-919.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Nurazzi, N., Asyraf, M. R. M., Rayung, M., Norrrahim, M. N. F., Shazleen, S. S., Rani, M. S. A., Shafi, A. R., Aisyah, H. A., Radzi, M. H. M. & Sabaruddin, F. A. (2021). Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers*, 13(16), 2710.
- Özsoy, K. & Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
- Peloquin, J., Han, Y. & Gall, K. (2023). Printability and mechanical behavior as a function of base material, structure, and a wide range of porosities for polymer lattice structures fabricated by vat-based 3D printing. *Additive Manufacturing*, 78, 103892.
- Petousis, M., Vidakis, N., Mountakis, N., Papadakis, V. & Tzounis, L. (2022). Three-dimensional printed polyamide 12 (PA12) and polylactic acid (PLA) alumina (Al₂O₃) nanocomposites with significantly enhanced tensile, flexural, and impact properties. *Nanomaterials*, 12(23), 4292.
- Qiu, N., Wan, Y., Shen, Y. & Fang, J. (2024). Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 261, 108657.
- Quintana, R., Choi, J.-W., Puebla, K. & Wicker, R. (2010). Effects of build orientation on tensile strength for stereolithography-manufactured ASTM D-638 type I specimens. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 201-215.
- Ramos, A., Angel, V. G., Siqueiros, M., Sahagun, T., Gonzalez, L. & Ballesteros, R. (2025). Reviewing Additive Manufacturing Techniques: Material Trends and Weight Optimization Possibilities Through Innovative Printing Patterns. *Materials*, 18(6), 1377.
- Rao, Y. S., Shivamurthy, B., Mohan, N. S., Shetty, N., Rangappa, S. M. & Siengchin, S. (2023). Investigation of tensile properties, hardness, and morphology of h-BN and MoS₂ filler modified carbon fabric/epoxy composites. *Cogent Engineering*, 10(1), 2178129.
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M. & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, 9(16), 3316.
- Saini, J. S., Dowling, L., Kennedy, J. & Trimble, D. (2020). Investigations of the mechanical properties on different print orientations in SLA 3D printed resin. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(11), 2279-2293.

- Saltık, O. & Özsoy, A. (2021). Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalatta Kullanılan Bağlayıcılar. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 3(1), 10-18.
- Shin, C. S. & Chang, Y. C. (2021). Fabrication and compressive behavior of a micro-lattice composite by high resolution DLP stereolithography. *Polymers*, 13(5), 785. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym13050785>
- Singh, M. & Jonnalagadda, S. (2020). Advances in bioprinting using additive manufacturing. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 143, 105167.
- Singh, N., Singh, R. & Ahuja, I. P. S. (2019). Thermomechanical investigations of SiC and Al₂O₃–reinforced HDPE. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(10), 1347-1360.
- Somdee, P., Shettar, M., Prasoetsopha, N. & Ansari, M. A. (2024). Reinforcing poly (lactic acid) /poly (butylene succinate) biodegradable blends with silicon carbide (SiC): A silane-coupled approach for enhanced mechanical and thermal performance. *Polymer Composites*.
- Sun, X., Mazur, M. & Cheng, C.-T. (2023). A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 67, 103463.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J. & Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>
- Swainson, W. K. (1977). *Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product*. Google Patents.
- Tang, T. W., Ritika, R., Tamtaji, M., Liu, H., Hu, Y., Liu, Z., Galligan, P. R., Xu, M., Shen, J. & Wang, J. (2025). Structured-Defect Engineering of Hexagonal Boron Nitride for Identified Visible Single-Photon Emitters. *ACS nano*, 19(9), 8509-8519. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c11413>.
- Tyagi, S., Yadav, A. & Deshmukh, S. (2022). Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1012-1016. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.073>
- Viet, N. V, Karathanasopoulos, N. & Zaki, W. (2022). Mechanical attributes and wave propagation characteristics of TPMS lattice structures. *Mechanics of Materials*, 172, 104363. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104363>
- Wang, S., Wang, J., Xu, Y., Zhang, W. & Zhu, J. (2020). Compressive behavior and energy absorption of polymeric lattice structures made by additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 15, 319-327. <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0549-7>
- Wohlers, T., Gornet, T., Mostow, N., Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Huff, R., Stucker, B., Fidan, I. & Doukas, A. (2016). *History of additive manufacturing*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4474824>
- Wong, K. V & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.
- Yalçın, B. & Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.

- Yalçın, B., Karakılınç, U. & Ergene, B. (2019). Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatla kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri. *Politeknik Dergisi*.
- 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). <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Yap, X. Y., Seetoh, I., Goh, W. L., Ye, P., Zhao, Y., Du, Z., Lai, C. Q. & Gan, C. L. (2021). Mechanical properties and failure behaviour of architected alumina microlattices fabricated by stereolithography 3D printing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 196, 106285. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106285>
- Yerane, K. & Rao, Y. (2022). A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). *Energies*, 15(23), 8994. <https://doi.org/10.3390/en15238994>
- Zakeri, S., Vippola, M. & Levänen, E. (2020). A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography. *Additive Manufacturing*, 35, 101177. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101177>
- Zhang, J., Chen, X., Sun, Y., Wang, Y. & Bai, L. (2023). Sound-absorption and mechanical properties of multisheet Gyroid lattice structures by stereolithography. *Composite Structures*, 325, 117589. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117589>
- Zhang, K., He, R., Ding, G., Bai, X. & Fang, D. (2021). Effects of fine grains and sintering additives on stereolithography additive manufactured Al₂O₃ ceramic. *Ceramics International*, 47(2), 2303-2310. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.071>
- Zhao, K., Su, Z., Ye, Z., Cao, W., Pang, J., Wang, X., Wang, Z., Xu, X. & Zhu, J. (2023). Review of the types, formation mechanisms, effects, and elimination methods of binder jetting 3D-printing defects. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 5449-5469. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.045>
- Zhou, J., Li, Y., Duan, X., Chen, J., Jin, E., Ding, D. & Xiao, G. (2024). Effects of h-BN on the thermal shock and oxidation resistance of SiO₂-bonded SiC refractories. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 21(5), 3526-3537. <https://doi.org/10.1111/ijac.14764>
- Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D. & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: a comprehensive review. *Sensors*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
- Zhuang, Z., Liu, Z., Cheng, B. & Liao, J. (2014). Chapter 5- Numerical Study of Two-Dimensional Fracture Problems with X-FEM. İçinde *Extended Finite Element Method* (ss. 75-101). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407717-1.00005-4>
- Zhuo, P., Li, S., Ashcroft, I. A. & Jones, A. I. (2021). Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109143>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Buğra ÖNLER

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Edirne Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesi, 2011

Lisans : Selçuk Üniversitesi, 2017

Yüksek Lisans : Sinop Üniversitesi

Mesleki Deneyim

İş Yeri : TSK, DZKK, 2019-Devam Ediyor