



**RE-ENTRANT ŞEKİLLİ ÖKZETİK YAPILARIN VE BOR NİTRÜR
KATKILI FİLAMENTLERİN KATMANLI İMALAT İLE ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Abdullah Taha ÖZEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

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

Abdullah Taha ÖZEN

30/06/2021

RE-ENTRANT ŞEKİLLİ ÖKZETİK YAPILARIN VE BOR NİTRÜR KATKILI
FİLAMENTLERİN KATMANLI İMALAT İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah Taha ÖZEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Bu tez kapsamında, iç bükey şekillerden yaygın olarak bilinen “re-entrant” şekilli ökzetik yapılar, eriyik yığma modelleme yöntemi ile çalışan bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Buna ilaveten re-entrant şekle benzer “eğri geometri” kafes yapısı tasarlanmıştır. Farklı boyutlarda üretilen bu yapılara çekme, basma ve mikrosertlik deneyleri uygulanarak ökzetik yapıların mekanik özellikleri ve eklemeli imalat alanında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Üç boyutlu yazıcıların ana malzemesi olarak seçilen polilaktik asit, bütün bu numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Daha sonra bu polimer içerisine seramik bor nitrür ilavesi gerçekleştirilerek yeni bir filament üretilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması yapılmıştır. Bor nitrür ilavesinin PLA polimerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Mekanik testlerden başarılı olarak geçen tüm numunelere XRD, SEM, OM, FTIR, TGA, DSC analizleri yapılarak, üretilen numunelerin mikroyapıları, üç boyutlu yazıcı tekniğinin mikroyapısal olarak incelenmesi, bor ilavesinin PLA üzerindeki davranışı belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, %1 miktarda bor ilavesinin PLA’nın mikrosertlik değerini %191 arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, re-entrant geometrili numunelerin Poisson oranları incelendiğinde, iki dal arasındaki açının azalmasının negatif Poisson oranını arttırdığı (-0,30) belirlenmiştir. Bu sonuç sonlu eleman analizi ile doğrulanmıştır ve elde edilen sonuç -0,31’dir. Buna ilaveten, eğri geometrili şekillerin Poisson oranı, eğri yarıçapının ne çok fazla ne de çok az olması gerektiğini gösterir. En yüksek negatif Poisson oranı eğri geometrinin eğri yarıçapı 12,5 mm olan değerde, -0,41 olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucuna göre bu değer -0,44 olarak hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Re-Entrant geometri, FDM, BN, Ökzetik yapılar
Sayfa Adedi : 109
Danışman : Prof. Dr. Ömer KELEŞ
İkinci Danışman : Prof. Dr. Zafer EVİS

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF RE-ENTRANT SHAPED AUXETIC
STRUCTURES AND BORON NITRIDE MIXED FILAMENTS BY ADDITIVE
MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Abdullah Taha ÖZEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

In the scope of this thesis, “re-entrant” shaped auxetic structures, which are commonly known from concave shapes, were produced using a three-dimensional printer working with the fused deposition modeling method. In addition, a “curvature geometry” lattice structure similar to the re-entrant shape was designed. Tensile, compression and microhardness tests were applied to these structures produced in different sizes, and the mechanical properties and usability of the auxetic structures in additive manufacturing were investigated. Polylactic acid, chosen as the main material of 3d printers, was used in the production of all these samples. Then, by adding ceramic boron nitride to this polymer, a new filament was produced and its mechanical properties were investigated. It has been observed that the addition of boron nitride improves the mechanical properties of the PLA polymer. By performing XRD, SEM, OM, FTIR, TGA, DSC analyzes on all samples that passed the mechanical tests, the microstructures of the produced samples, microstructural examination of the three-dimensional printer technique, and the behavior of boron addition on PLA were determined. When the results were examined, it was observed that adding 1% boron increased the microhardness value of PLA by 191%. In addition, when the Poisson ratios of the samples with re-entrant geometry were examined, it was determined that the decrease in the angle between the two branches increased the negative Poisson ratio (-0.30). This result has been confirmed by finite element analysis and the result is -0.31. In addition, the Poisson's ratio of curvature shapes indicates that the radius of the curve should neither be too much nor too little. The highest negative Poisson ratio was calculated as -0.41 for curvature geometry with a radius of 12.5 mm. According to the results of the finite element analysis, this value was calculated as -0.44.

Science Code : 91438

Key Words : Re-Entrant geometry, FDM, BN, Auxetic structures

Page Number : 109

Supervisor : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Co-Supervisor : Prof. Dr. Zafer EVİS

TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğum yüksek lisans tez çalışması sürecinde tecrübelerini paylaşmayı benden esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ömer KELEŞ ve Prof. Dr. Zafer EVİS'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmam içerisinde gerçekleştirdiğim deneylerde, laboratuvar ve ekipmanların kullanımında gerekli imkanların sağlanmasından dolayı TENMAK Bor Araştırma Enstitüsü'ne teşekkür ederim.

Tez sürecim içerisinde gerçekleştirdiğim akademik araştırmalar kapsamında benimle deneyimlerini paylaşan Merve BİLGE, Soner ÖZTÜRK, Hossain JODATİ ve Ali MOTAMENİ'ye teşekkür ederim.

Deneysel ve teorik tüm çalışmalarım boyunca bana yardımları dokunan Arş. Gör. Mahmut Şamil KAYA ve Arş. Gör. Mustafa Alper SARIİPEK'e teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan annem Ayşe Yeşim TÜRKMEN ve kardeşim Bilge Hüma ÖZEN'e ve her koşulda beni destekleyen kıymetli arkadaşım Kübra ÇELİK'e teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat ve Üç Boyutlu Yazıcılar	5
2.1.1. Polimer esaslı üç boyutlu yazıcılar	7
2.2. Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Polimerler ve Bu Polimerlere Toz Katkılandırılması	12
2.3. Bor Katkılı Kompozit Malzemeler.....	30
2.3.1. Bor nitrür ve PLA kompozitleri	31
2.4. Kafes Yapılar ve Poisson Oranı	32
2.4.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapılar	34
3. DENEYSEL YÖNTEM	41
3.1. Bor Nitrür İçeren PLA Filament Üretimi ve FDM Yönteminde Kullanımı	41
3.2. Re-entrant Şekilli Ökzetik Yapıların Üretimi, Mekanik Testleri ve Karakterizasyonları	43
3.2.1. Ökzetik yapıların mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar analizi ile doğrulanması.....	47

	Sayfa
4. DENEY SONUÇLARI	49
4.1. Bor Nitrür İçeren PLA Filament Çekilmesi ve Üç Boyutlu Yazıcıda Kullanımı, Deney ve Analiz Sonuçları	49
4.2. Kafes Yapıların Üç Boyutlu Yazıcılarda Üretimi	54
4.2.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapıların FDM ile üretimi ve analizleri	54
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN KONTROLÜ VE DOĞRULANMASI.....	65
5.1. Kafes Yapıların Çekme ve Basma Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Polimerler içerisine katkılandırılan tozlar.....	13
Çizelge 2.2. PLA içerisine katkılandırılan tozlar.....	15
Çizelge 2.3. 3d yazıcıda kullanılan polimerler ve kullanım nedenleri	24
Çizelge 2.4. Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler	26
Çizelge 2.5. Kafes geometriler ve sahip oldukları Poisson oranları.....	39
Çizelge 3.1. Deney tasarımından önce ve deney tasarımından sonraki üretilmesi planlanan numune sayıları	44
Çizelge 3.2. Deney tasarımına göre üretilmesi gereken çekme numunesi sayısı	45
Çizelge 3.3. Deney tasarımına göre üretilmesi gereken basma numunesi sayısı	46
Çizelge 4.1. h-BN katkılı kompozitlerin yoğunluk ve mikrosertlik değerleri	49
Çizelge 4.2. Üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	55
Çizelge 4.3. Re-entrant geometrili ökzetik çekme deney numunelerinin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri	57
Çizelge 4.4. Re-entrant geometrili ökzetik deney numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden faktörler	58
Çizelge 4.5. Eğri geometrili ökzetik çekme deney numunelerinin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri	59
Çizelge 4.6. Eğri geometrili ökzetik deney numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden faktörler	59
Çizelge 4.7. Re-entrant geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranları	61
Çizelge 4.8. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranları	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapılar: A) Negatif Poisson oranına sahip yapılar; 1) Re-entrant kafes yapı; 2) Yıldız kafes yapı; 3) Kagome kafes yapı; 4) Anti-trichiral kafes yapı; B) Pozitif Poisson oranına sahip kafes yapılar; 1) Bal peteği kafes yapı; 2) Elmas kafes yapı; 3) Ok başı kafes yapı; 4) Üçgen kafes yapı.	2
Şekil 1.2. Eklemeli imalat yöntemleri.....	3
Şekil 2.1. SLA yöntemi ile çalışan bir 3d yazıcının şematik gösterimi	8
Şekil 2.2. FDM yöntemi ile çalışan bir 3d yazıcının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.3. Kafes geometrili yapılar: a) Üçgen geometri; b) Kare geometri; c) Elmas geometri; d) Altıgen geometri; e) Re-entrant geometri; f) Ok başı geometri; g) Yıldız geometri; h) Kagome geometri; i) Kiral geometri.....	36
Şekil 3.1. Ökzetik yapıli kafes geometrilerin birim hücreleri: a) Re-entrant şekil; b) Eğri şekil.	47
Şekil 4.1. h-BN katkıli numunelerin DSC analizi.....	50
Şekil 4.2. h-BN katkıli numunelerin TGA analizi	52
Şekil 4.3. h-BN katkıli numunelerin XRD analizi: a) 100PLA numunesi; b) 99PLA/1h-BN numunesi.....	53
Şekil 4.4. h-BN katkıli numunelerin FTIR analizi: a) 100PLA numunesi; b) 99PLA/1h-BN numunesi.....	54
Şekil 5.1. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	66
Şekil 5.2. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.3. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin çekme dayanımlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	70
Şekil 5.4. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları...	73
Şekil 5.5. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	73

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin çekme dayanımlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.7. Re-entrant şekilli basma deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları	79
Şekil 5.8. Re-entrant geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması	80
Şekil 5.9. Re-entrant geometrili ökzetik basma deney numunelerinin basma dayanımlarının deneysel ve sayısal sonuçları	82
Şekil 5.10. Eğri şekilli basma deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları.	84
Şekil 5.11. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.12. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin basma dayanımlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması.....	87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. PLA' nın kullanım evreleri: a) Granül formu; b) Filament formu; c) 3 boyutlu baskı formu.....	4
Resim 2.1. Bu tezde kullanılan 3D4E EMESYS marka 3d yazıcı	7
Resim 2.2. PLA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	17
Resim 2.3. ABS: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	18
Resim 2.4. PEEK: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	19
Resim 2.5. PVA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	20
Resim 2.6. PE: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	21
Resim 2.7. PU: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	22
Resim 2.8. PA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	22
Resim 2.9. Polyester: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	23
Resim 2.10. PETG: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form.	24
Resim 2.11. THF ile karıştırılıp kurutulmuş olan PLA/h-BN kompozitleri.	30
Resim 3.1. PLA/h-BN üretim aşamaları: a) Homojen karıştırılıp kurutulan formu; b) Ekstrüder için küçültülmüş form; c) Granül form; d) PLA/h-BN filament; e) 3d yazıcı formu.	42
Resim 4.1. Üretilen ökzetik yapılı kafes geometriler: a) Re-entrant şekil; b) Eğri şekil.	55
Resim 4.2. Mekanik özellik olarak en düşük sonuç veren negatif Poisson oranına sahip şekiller: A-1) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; A-2) Re-entrant kafes geometri CAD çizimi; A-3) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; A-4) Re-entrant kafes geometri 3d yazıcıda üretilmiş form; B-1) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; B-2) Eğri kafes geometri CAD çizimi; B-3) Eğri kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; B-4) Eğri kafes geometri 3d yazıcıda üretilmiş form.....	60

Resim	Sayfa
Resim 4.3. Mekanik özellik olarak en düşük sonuç veren negatif Poisson oranına sahip şekiller: A-1) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; A-2) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; B-1) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; B-2) Eğri kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form.	63
Resim 5.1. En düşük negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H60L40A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	68
Resim 5.2. En yüksek Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H40L40A850: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	69
Resim 5.3. En yüksek çekme dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H60L40A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	71
Resim 5.4. En düşük çekme dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H50L45A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	72
Resim 5.5. En düşük negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R125D15: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	74
Resim 5.6. En yüksek negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R100D10-1: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.	75

Resim	Sayfa
Resim 5.7. En yüksek çekme dayanımına sahip Eğri şekil, E-R150D15: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.	77
Resim 5.8. En düşük çekme dayanımına sahip Eğri şekil, E-R150D10: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.	78
Resim 5.9. En düşük negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L35A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.....	81
Resim 5.10. En yüksek negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H40L50A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.	81
Resim 5.11. En yüksek basma dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L35A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.	82
Resim 5.12. En düşük basma dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L65A70: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.	83
Resim 5.13. En düşük negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R450D12: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.	86
Resim 5.14. En yüksek negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R200D10-3: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.	86

Resim**Sayfa**

- Resim 5.15. En yüksek basma dayanımına sahip Eğri şekil, E-R450D10:
 a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi. 87
- Resim 5.16. En düşük basma dayanımına sahip Eğri şekil, E-R325D10:
 a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi. 88

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

E

Elastik modül

ϵ

Gerinim

σ

Çekme/Basma mukavemeti

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABS

Akrilonitril butadiyen stiren

Al₂O₃

Aluminyum oksit

ASTM

Uluslararası Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu

BN

Bor nitrür

c-BN

Kübik bor nitrür

CO₂

Karbondioksit

DCM

Diklormetan

DSC

Diferansiyel taramalı kalorimetre

EBM

Elektron ışın ergitme

FDM

Eriyik yığılma modelleme

FTIR

Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi

HAP

Hidroksiapatit

h-BN

Hekzagonal bor nitrür

HCl

Hidroklorik asit

ISO

Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı

OM

Optik mikroskop

PA

Poliamit

PE

Polietilen

PEG

Polietilen glikol

PEEK

Polieter eter keton

Kısaltmalar**Açıklamalar****PETG**

Polietilen tereftalat

PLA

Polilaktik asit

PU

Poliüretan

PVA

Polivinil alkol

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

SiC

Silisyum karbür

SiOC

Silikon oksit karbon

SLA

Stereolitografi

SLM

Seçili lazer ergitme

SLS

Seçili lazer sinterleme

THF

Tetrahidrofuran

TiO₂

Titanyum oksit

TGA

Termogravimetrik analiz

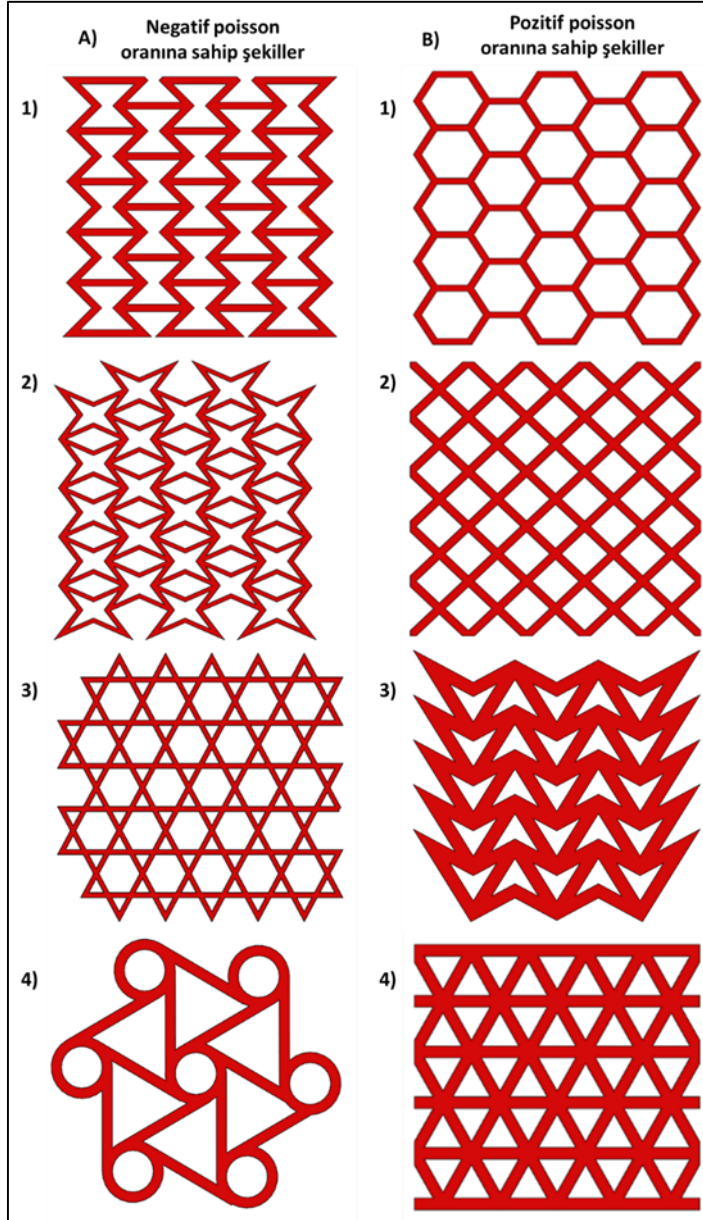
XRD

X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Geleneksel imalat yöntemleri ile yalnızca büyük boyutlarda ve basit geometrilerde üretim yapılabilmektedir. Bu durum projelendirme, üretim, Ar-Ge ve yenilikçi tasarım çalışmalarının gelişimini kısıtlamaktadır (McCaw ve Cuan-Urquizo, 2018). Bu nedenle bu duruma çözüm olması açısından eklemeli imalat teknolojisi geliştirilmeye başlanmıştır (Karamooz Ravari v.d., 2014). Eklemeli imalat ile karmaşık geometrili yapıların üretimi sağlanabilmekte, çok küçük boyutlarda üretim yapılabilmekte ve kişiye/projeye özgü tasarım yapılabilmektedir (Chun ve Kowalik, 2018).

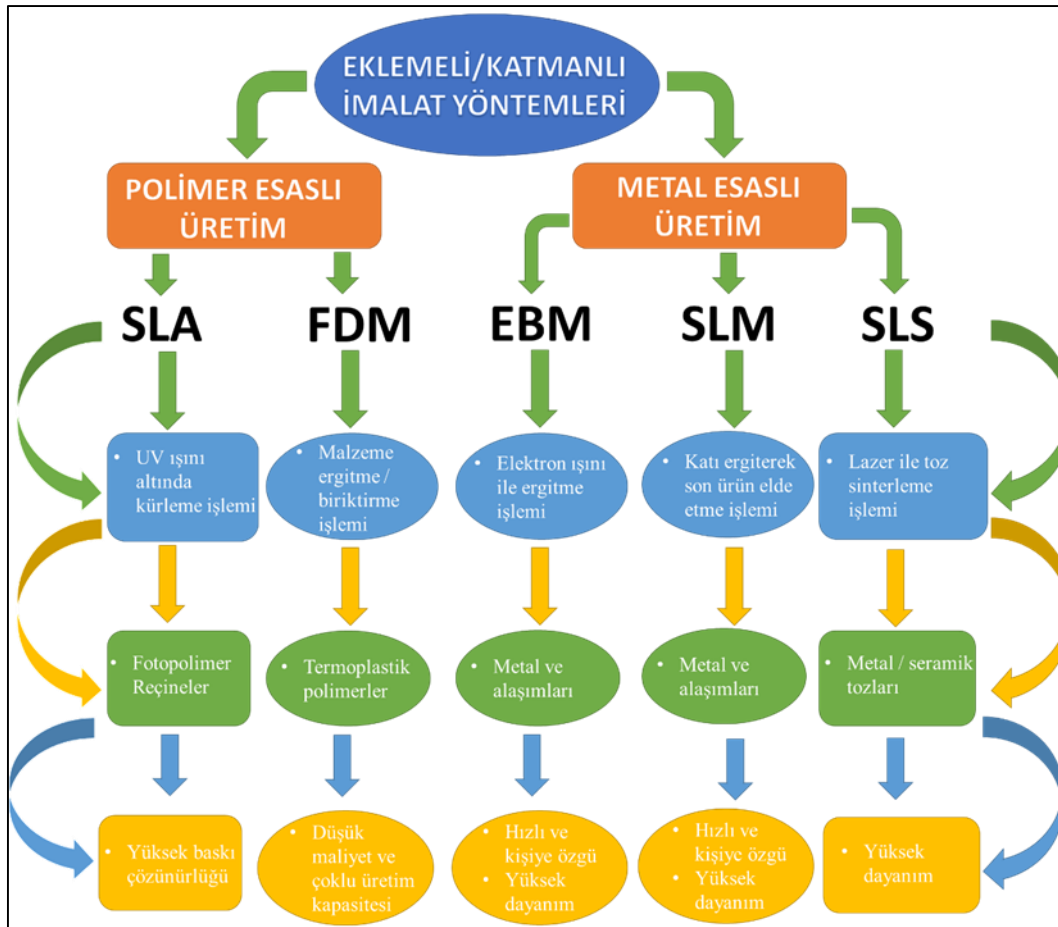
Bir malzeme çekme deneyine tabi tutulduğunda, çekme yönüne dik daralma eğilimi göstermesi Poisson oranının pozitif olması ile ifade edilir (Choi v.d., 2019). Pek çok malzeme bu özelliği gösterir. Bu özelliği gösteren tüm malzemelerin Poisson oranı pozitif olup bu değer genellikle 0,3 civarındadır. Ancak, doğada Poisson oranı sıfırdan küçük olan malzemeler de mevcuttur. Nadir olarak kullanılan bu malzemeler ökzetik olarak adlandırılır (Wang v.d., 2018). Negatif Poisson oranına sahip bu yapılar genellikle kafes yapılardan oluşmaktadır. Bir şeklin negatif Poisson oranına sahip olması tamamen şeklin kafes geometrisiyle ilgilidir. Şeklin kenar uzunlukları ve iç açılarına göre konveks (Pozitif Poisson oranı) yada konkav (Negatif Poisson oranı) olan şekiller farklı Poisson oranı değeri gösterirler (Carneiro v.d., 2019). Poisson oranı negatif olan yapılar pozitif olanlara göre daha yüksek sertlik ve daha iyi basma mukavemeti gibi gelişmiş mekanik özellikler gösterirler. Bu yapıların bir başka özelliği ise hafif olmalarıdır (Gao v.d., 2020a). Üstün mekanik özellikler gösteren bu ökzetik yapılar havacılık ve uzay sanayisinde, otomotiv sanayisinde ve biyomedikal alanında kullanılmaktadır (Ai ve Gao, 2018). Şekil 1.1’de, pozitif ve negatif Poisson oranına sahip kafes yapıları gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapılar: A) Negatif Poisson oranına sahip yapılar; 1) Re-entrant kafes yapı; 2) Yıldız kafes yapı; 3) Kagome kafes yapı; 4) Anti-trichiral kafes yapı; B) Pozitif Poisson oranına sahip kafes yapılar; 1) Bal peteği kafes yapı; 2) Elmas kafes yapı; 3) Ok başı kafes yapı; 4) Üçgen kafes yapı.

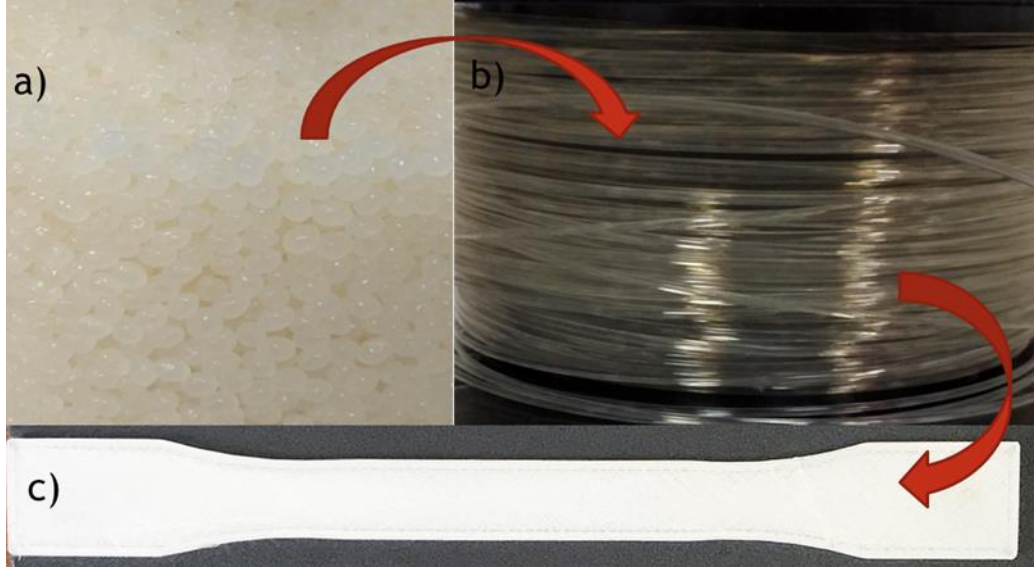
Eklemeli imalat ile polimer bazlı üretim yapılabilir (Francesconi v.d., 2019; Hu v.d., 2019a; Wang v.d., 2020a). Geliştirilen katmanlı imalat teknolojileri, metal işlemeye dayalı katmanlı üretim olarak Seçkili Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işın Ergitme (EBM) şeklinde sıralanabilir (Neçemer v.d., 2020; Xiao v.d., 2019). Ayrıca, katmanlı imalat ile polimer bazlı üretimler yapılabilir. Polimer bazlı üretime dayalı katmanlı imalat olarak Stereolitografi (SLA), Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) şeklinde sıralanabilir (Chun ve

Kowalik, 2018; Li v.d., 2019). Şekil 1.2, eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılmasını göstermektedir.



Şekil 1.2. Eklemeli imalat yöntemleri

Polilaktik asit (PLA) biyoçözünebilir bir termoplastiktir. Biyoçözünebilir olması PLA'nın biyomedikal alanında kullanılabilirliğini göstermektedir (Prasad v.d., 2017). Ayrıca, PLA biyobozunur olduğundan çevre kirliliği etkisinin olmamasından ötürü gıda ambalajlamada kullanılmaktadır (Risyon v.d., 2020). Buna ilaveten, PLA, yüksek mukavemetli, yüksek elastik modül gibi özelliklerinden dolayı paketlenmede kullanılabilmektedir (Chuensangjun v.d., 2013). PLA'nın termoplastik özelliği ise ısıya maruz kaldığında şekil verilebilir olduğunu göstermektedir. Bu nedenle PLA üç boyutlu (3d) yazıcılarda sıklıkla tercih edilen bir malzemedir (Damanpack v.d., 2019; Quan v.d., 2020; Yazdani Sarvestani v.d., 2018). Bu nedenle bu tezde yapılacak çalışmalarda PLA polimeri tercih edilmiştir. Resim 1.1, PLA'nın filament olana kadar geçirdiği evreleri göstermektedir.



Resim 1.1. PLA' nın kullanım evreleri: a) Granül formu; b) Filament formu; c) 3 boyutlu baskı formu.

Bu tezde, PLA filamentine bor nitrür ilavesi farklı karışım yüzdelerinde katkılandırılarak PLA filamentinin mekanik özelliklerinde en az %10 artış hedeflenmektedir. Bu tez kapsamında, polimer içerisine seramik toz ilavesi ile yeni bir filament üretimi yapılmıştır. Buna ilaveten, negatif Poisson oranına sahip kafes yapılar, farklı en, boy, kalınlık ve açılarda FDM ile üretilerek mekanik özellikleri (çekme mukavemeti, basma mukavemeti, elastik modül ve Poisson oranı) ve mikroyapı analizleri (FTIR, XRD, DSC, TGA) bu tez kapsamında yapılmıştır. Kafes yapılar, Re-entrant geometri olarak belirlenmiş ve Eğri geometri olarak yeni bir kafes yapı önerilmiştir. Eğri geometri, içbükey köşe içermemesinden dolayı özgün bir geometriye sahiptir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Eklemeli İmalat ve Üç Boyutlu Yazıcılar

“Eklemeli imalat” veya bilinen diğer adıyla “katmanlı imalat”, nihai ürün üretim süresini en aza indirmek, nihai ürün oluşturmak için gereken prosesleri azaltmak ve endüstriyel alanlarda kullanılan ancak, üretimi zor karmaşık 3d geometrilerin üretimini kolaylaştırmak amacıyla doğmuş günümüz yüksek teknolojisidir (Cowley v.d., 2019). İlk çalışmalarda henüz nihai ürün elde edilebilecek kalite ve performansta geliştirilemediğinden prototip oluşturulup, prototipler üzerinden nihai ürün geliştirilme çalışması yapılmıştır. Bundan dolayı eklemeli imalat ilk yıllarda “Hızlı prototipleme” olarak bilim dünyasına duyurulmuştur. Ayrıca, hızlı prototipleme teknolojisi ile kalıp üretilmekte ve bu kalıba döküm yapılarak nihai ürün elde edilmektedir (Xue v.d., 2018; Xue ve Han, 2019; Xue v.d., 2019). İlerleyen çalışmalarda ve gerçekleştirilen testlerde, eklemeli imalat ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri, elektriksel özellikleri, ısı özellikleri, yüzey kalitesi ve boyutsal tamliklerinin nihai ürün için gereken değerleri karşıladığı gözlemlenmiştir. Böylece “hızlı prototipleme” geliştirilerek “eklemeli imalat” olarak bilim dünyasında kullanılmaya başlanmıştır. Eklemeli imalat, üretim prensibi olarak isminden de anlaşıldığı gibi eklem prensibi ile çalışmaktadır. Düz bir platform üzerine katman katman toz/filament biriktirme ve nihai ürün oluşturma temeline dayanmaktadır (Liu v.d., 2019). Katman katman gerçekleştirilen bu “yazdırma” işlemi, tipik bir yazıcı prensibi ile aynı yöntemle dayandığından eklemeli imalat yönteminde kullanılan sistemlere genellikle “3d yazıcı” adı verilmektedir. Günümüzde eklemeli imalat ve 3d yazıcı teknolojisi; yüksek hassasiyet, kompleks yapıların üretimi, kişiye özgü imalat ve hızlı üretim sebeplerinden dolayı hızla önem kazanmaktadır (Lay v.d., 2019).

Eklemeli imalat teknolojileri parça üretiminde büyük kolaylık sağlamasından dolayı biyomedikal, uzay ve havacılık, otomotiv, askeri, mimari, heykeltçilik ve kuyumculuk gibi endüstri alanları için parça üretiminde tercih edilmektedir (Gao v.d., 2020b; Nunes ve Silva, 2016). Buna ilaveten bu teknoloji, numunelerin hızlı bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Özellikle kompleks parçaların üretimini ve tamiratını kolaylaştırır. Eklemeli imalat teknolojisi nihai ürünlerine örnek olarak uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan gaz türbini ve bileşenleri örnek olarak gösterilebilir (Najmon v.d., 2019). Ayrıca, mekanik

dişliler, türbin kanatçıkları, vida ve cıvatalar, diş protezleri, elektronik sensörler, kalp ve damar stentleri de örnekler arasında gösterilebilir (Matta v.d., 2018; Sharma v.d., 2018). Günümüzde, insansız hava araçları, yakıt nozulları ve biyomedikal implantlar eklemeli imalat kullanılarak üretilmektedir (Singh v.d., 2018). Literatürde medikal alanında yapılan çalışmalar 3d yazıcı teknolojisinde en büyük yeri kapsamaktadır. Eklemeli imalat ile kişiye özel medikal ve dental implant üretimi, canlı doku ve yapay organ baskısı bu alandaki çalışmalardan bazılarıdır (Mohd Pu'ad v.d., 2020). Eklemeli imalatın kişiye özgü üretim, yüksek hassasiyet ve doğruluk ile hızlı nihai ürün teslimi özelliklerinin kıyaslanabileceği en uygun örnek, dişçilik alanında üst çene kemiği yapılandırma işlemi standart implantlar kullanılarak 13 saatte gerçekleştirilirken, eklemeli imalat yöntemiyle aynı süreç 2,5 saat gibi daha kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir. Buna ilaveten, İngiltere'de eklemeli imalat yöntemiyle üretilen leğen kemiğinin nakledildiği kanser hastası bu yöntemin uygunluğu bakımından pozitif sonuçlar vermiştir. Bir diğer önemli çalışma ise Hollanda'da eklemeli imalat yöntemiyle kişiye özel kafatası üretilerek sentetik bir kafatası ile değiştirilmiştir (Özsolak, 2019; Özsoy ve Duman, 2017).

Geleneksel imalat yöntemleri ile eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırıldığı akademik çalışmalar incelendiğinde; ABS polimerinin çekme dayanımı ile darbe dayanımı analizi, enjeksiyon kalıplama ve FDM yöntemleri kullanılarak belirlendiği, böylece 2 yöntemin de pozitif ve negatif yönleri belirlendiği gözlemlenmiştir (Dawoud v.d., 2016). Buna ilaveten, PLA, ABS ve Nylon 6 polimerleri kullanılarak FDM ile geleneksel imalat yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırması yapılan parametreler olarak, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve elastik modül söylenebilir (Lay v.d., 2019). Ayrıca, yine PLA polimerinin elastik modülü ve çekme dayanımı eklemeli imalat ile geleneksel imalatın karşılaştırılması üzerine yapılan bir araştırmada kullanılmıştır (Cisneros-López v.d., 2020). Bir başka çalışmada ise vakumlu döküm (-0,5 bar) ile FDM (190°C, 30 mm/s) yöntemi karşılaştırılmıştır. Dökümde WWAS epoksi reçine malzemesi kullanılırken, FDM yönteminde PLA tercih edilmiştir. 2 yöntemle de üretilen çekme deney numuneleri optik mikroskop (OM) altında incelenmiş ve çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Sıcaklık arttıkça yüzey pürüzlülüğü ve porozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Çekme dayanımı değerlerinin PLA için 50 MPa ve reçine için 35 MPa olarak bulunması sonucu FDM yönteminin vakumlu döküme olan üstünlüğü kanıtlanmıştır (Valerga Puerta v.d., 2018).

3d yazıcılar çalışma prensibi olarak, CAD ortamında tasarlanan bir geometrinin, yazdırma formatına (STL) ve GCODE adı verilen 3d yazıcıların yazdırma programına dönüştürülerek 3d yazıcı içerisine aktarılması ve tasarlanan bu geometrinin bir platform üzerinde oluşturulması şeklinde çalışmaktadır (Durga Prasada Rao v.d., 2019). Bu tezde üretilen deney numunelerinin üretiminde kullanılan polimer esaslı bir 3d yazıcı Resim 2.1’de verilmiştir.

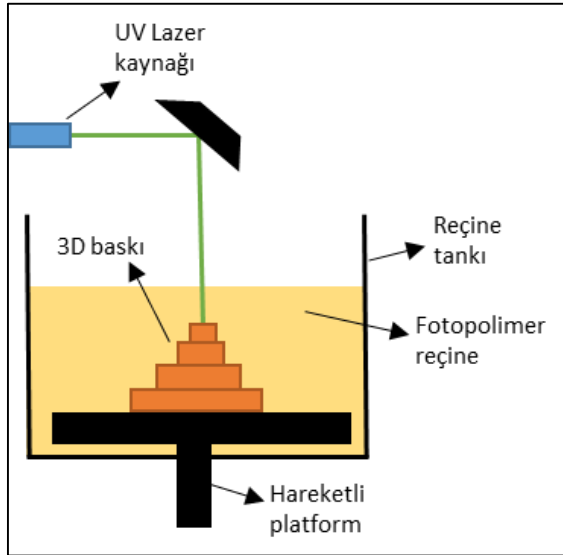


Resim 2.1. Bu tezde kullanılan 3D4E EMESYS marka 3d yazıcı

2.1.1. Polimer esaslı üç boyutlu yazıcılar

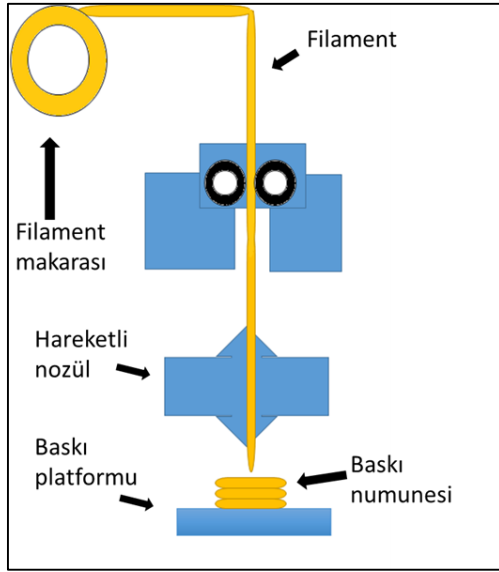
Polimer esaslı 3d yazıcılar, termoplastik özelliğe sahip polimerlerin ergitilerek bir platform üzerinde biriktirilmesi işlemine dayanmaktadır. Polimer esaslı 3d yazıcılar, SLA ve FDM olarak iki ana yöneme ayrılmaktadır. Bunlardan SLA, fotopolimer (ışık altında katılaşabilen) özelliğe sahip sıvı reçine içerisine UV ışını yansıtılması ve tasarımın katman katman oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan fotopolimer reçinelere örnek olarak epoksi, akrilik ve kauçuk verilebilir. Bu yöntemin prensibi gereği, sıvı reçinelerin katılaşması işlemi en yoğun şekilde mumsu kıvama gelene kadardır. Dolayısıyla SLA yöntemi ile üretilen nihai ürünlerin mekanik özellikleri oldukça düşüktür ve çok sayıda ardıl işleme tabi tutulması gerekmektedir. Bu nedenle bu yöntem genellikle kalıp üretimi ve ardından döküm yöntemi ile nihai ürün üretimine dayanmaktadır. Çözünürlük kalitesinin oldukça yüksek, temin edilebilirliğinin ucuz olması ve çabuk sonuç verebilmesi sebebiyle bu yöntem ile kalıpcılık sektörüne bir ışık olmuştur. Literatürdeki SLA çalışmalarına örnek olarak; akrilik reçine kullanılarak basma ve indentasyon

numuneleri üretilmiş ve bu numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır (Li v.d., 2019). Ayrıca, UV etkileşimli başka bir reçine kullanılarak yine bir basma numunesi üretilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir (Fu v.d., 2018; Mahbod ve Asgari, 2019; Wang, 2018). ABS'nin SLA içerisinde kullanımı ile farklı kafes yapılar şeklinde üretilen basma numunelerinden mekanik özellik bakımından en iyilik tartışılmıştır (Gao v.d., 2020b). SLA ile gerçekleştirilen kalıpcılık çalışmalarına örnek olarak; epoksi malzemeden SLA yöntemi ile kalıp oluşturulmuş ve alüminyum döküm ile nihai ürün elde edilmiştir. Bu çalışmalarda üretilen bu ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basma numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir (Tan v.d., 2019; Xue v.d., 2018; Xue ve Han, 2019; Xue v.d., 2019). Şekil 2.1'de SLA yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. SLA yöntemi ile çalışan bir 3d yazıcının şematik gösterimi

FDM ise filament formundaki polimerin ergitilerek katman katman biriktirilmesi işlemidir. Şekil 2.2'de FDM yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. FDM yöntemi ile çalışan bir 3d yazıcının şematik gösterimi

FDM yöntemi ile yapılan çalışmalara bakıldığında ilaç sektörü ve biyomedikal endüstrisi bu yöntemi en çok tercih eden sanayi alanıdır. İlaç sektöründe kullanılmak üzere farklı kütlelerde, çok küçük boyutlarda yapılan karışımların üretimi FDM yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Alhijaj v.d., 2016; Ilyés v.d., 2019; Melocchi v.d., 2016; Saviano v.d., 2019; Wei v.d., 2020a). Örnek olarak, Affnisol (236.145 mg), Kolliphor (15.743 mg) ve Carvediol (62.972 mg) kütlece %75/%5/%20 oranlarında karıştırılmış ve FDM yöntemi ile eczacılık endüstrisi için ilaç üretiminde kullanılmıştır (Ilyés v.d., 2019). Ayrıca, biyomedikal sektöründe kullanılmak üzere prototip insan kemiği, kemik kafes yapıları, biyofilamentler ve çeşitli implantlar geliştirilmiştir (Gu ve Li, 2002; Mohd Pu'ad v.d., 2020; Sharma v.d., 2018; Singh v.d., 2018). Örnek olarak, kemik doku mühendisliğinde kullanılmak üzere FDM yöntemi ile PLA (%90)/HAP (%8)/Kitosan (%2) kompozit çekme numuneleri üretimi gerçekleştirilmiştir. %100 PLA ya göre elastik modül (%31) ve çekme dayanımında (%27) düşüş gözlemlenmiştir (Ranjan v.d., 2020). Uçak içerisindeki kapılar, kapı kolları, kanat parçaları, teker braketleri ve kompozit sandviç paneller gibi mekanik aksamın üretimi için geliştirilmektedir (Najmon v.d., 2019; Nunes ve Silva, 2016). FDM yöntemi ile üretilen PLA/karbon fiber kompozit numuneler kütlece %85 PLA ve %15 karbon fiber karışımından elde edilmiş ve çekme ve eğme deney numuneleri üretilmiştir. PLA'nın çekme dayanımı katkılandırma sonrası %24 artış (38 MPa - 50 MPa) göstermiştir. Eğme dayanımı ise %22 artış (64 MPa - 78 MPa) göstermiştir. Mikrosertlik değerlerindeki değişim ise %62 artış (21 HV – 34 HV) eğilimindedir (Gavali v.d., 2020). Buna ilaveten otomotiv sanayisinde, araç içerisinde üzerine ağır yük binmeyen yatakların, fazla zorlanma veya aşınma gerektirmeyen

araba parçalarının üretiminde, robotik kolların üretiminde ve türbin kanatçıkları üretiminde kullanılmıştır (Gao v.d., 2020b; Matta v.d., 2018; Wajahat v.d., 2020).

FDM yönteminin katkısının araştırılmakta ve geliştirilmekte olduğu bir diğer sektör de gıda sektörüdür. Gıda üretimi için, gıda türüne uygun geliştirilmiş yazıcı tasarımları bulunmaktadır. 3d yazıcı teknolojisi malzemelerinin ham madde olarak gıda maddeleri çalışılması ve bu teknolojinin gıda üretimine de kullanılabileceği gösterilmiştir. İlk olarak bisküvi üretimi ve kek süslemeleri, şeker, su ve çikolatanın karıştırılıp ürün yüzeyine yazdırılması şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, makarna üretimi de mevcuttur (Değerli ve El, 2017; Karaman ve Çolak, 2019). Yapılan çalışmalarda, yaygın olarak kullanılan filamentlere (PLA, ABS) farklı miktarlarda metal veya seramik tozlar katkılanmış ve bu filamentlerin mekanik özelliklerinde (sertlik, elastik modül, çekme dayanımı) artış gözlemlenerek 3d yazıcı dünyasında geliştirme sağlanmıştır (Eren ve Sezer, 2019; Gorjan v.d., 2019; Jing v.d., 2020; Sezer v.d., 2016; Sezer v.d., 2017).

Yukarıda anlatıldığı gibi, FDM yöntemi ile bir ürün üretmenin birden çok parametresi bulunmaktadır. En uygun mekanik özelliklerde ve yüzey kalitesinde nihai ürün eldesi için tüm bu parametrelerin kusursuz bir şekilde çalışması gerekmektedir. Bunlar;

- 3d yazıcı nozul sıcaklığı
- 3d yazıcı tabla sıcaklığı
- Üretim hızı
- Soğutucu fan hızı
- Üretim yönü
- Nozul çapı, çözünürlük
- Katman kalınlığı
- İç doluluk
- Kullanılan filamentin özellikleri

Şeklinde sıralanmıştır (Evlen, 2019; Karaman ve Çolak, 2019).

Nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, üretim hızı, soğutucu fan nihai ürün kalitesine etki bakımından birbirleriyle ilişkilidirler. Filamentin tabla üzerine bırakılmasını sağlayan nozul, üniform bir sıcaklığa sahip olmalıdır. Ayrıca, bu sıcaklık, termoplastik bir polimerin

iyi ergiyip, tabla üzerinde kusursuz bir katman katman biriktirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için olabildiğince yüksek olmalıdır. Örneğin PLA filamentinin katmanlarının birbirine tam yapışabilmesi için önerilen nozul sıcaklık değeri 180°C ile 215°C aralığındadır. Ergitilen filament, biriktirilen tablaya %100 tamlıkta yapışabilmesi için tablanın ısıtılması gerekmektedir. Bu sıcaklık değeri fazla yüksek olmamakla beraber polimerler arasında çeşitlilik göstermektedir. PLA için önerilen yazıcı tablası sıcaklığı 50°C ile 70°C aralığında iken bu değer ABS için 80°C ile 100°C aralığına çıkabilmektedir. Bu fark tamamen termoplastik malzemeler ile ilgilidir. İstenilen ürünü oluşturmak için katman katman biriktirilen filamentler üstün mekanik özellikler ve darbelere karşı dayanım için birbiri içerisine daha sıkı yapışmalıdır. Bu işlem üretilen parçanın üzerinde ısının uzun bir süre hapsedilmesiyle gerçekleştirilebilir. Yani FDM yöntemi ile üretilen bir ürünün üstün mekanik özelliklere sahip olabilmesi için üretim hızı yavaş olmalıdır (Carlier v.d., 2019; Yao v.d., 2019). Yavaş hareket eden bir nozul, barındırdığı ısıyı olabildiğince fazla miktarda parçaya aktarmaktadır. Böylece nihai ürün fazla miktarda ısıya maruz bırakılarak üretilmiş olmaktadır. Bu durum soğutucu fanın kullanılmaması ile de sağlanabilmektedir. Ancak, soğutucu fanın çalıştırılmasının nihai ürünün yüzey kalitesinde olumsuz etkileri olabilmektedir. Fan hızının maksimum olması, çekme dayanımını artırırken, yüzey kalitesini kötü etkilemiştir (Lee ve Liu, 2019). Buna ilaveten nozul çapı, çözünürlük ve katman kalınlığı parametreleri, nihai ürün çıktısının daha hassas üretiminde etkilidir. Mikron boyutundaki küçük çaplardaki deliklerin ve boşlukların üretilmesi 3d yazıcının yüksek çözünürlükte çalışabilmesine bağlıdır. Nozul çapı, hassasiyet bakımından nozulün bıraktığı filamentin inceliğini belirlemektedir. Katman kalınlığı ise yine birbirlerine yapışan katmanların mekanik özelliklere etkisiyle ilişkilidir (Buj-Corral v.d., 2019). Üretim yönü, çekme yönüne dik, çekme yönüne paralel veya çekme yönü ile 45° açı oluşturacak şekilde üretilen numunelerin karşılaştırma çalışmaları sıklıkla yapılmış ve 45° açıda üretilen 3d yazıcı çıktılarının mekanik özelliklerinin diğer ürünlere oranla daha üstün olduğu gözlemlenmiştir (Liu v.d., 2019; Yao v.d., 2019).

Yukarıdaki parametrelerin nihai ürüne etkisinin (yüzey kalitesi, mekanik çıktılar) çalışıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, PLA'nın çekme yönüne göre farklı üretim yönünde (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) çekme numuneleri üretimi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Liu v.d. 2019; Yao v.d. 2019). Başka bir karşılaştırma olan farklı polimerlerin değerlendirilmesi kapsamında, ABS ve PLA gibi farklı filamentler ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, ABS'nin çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin PLA'dan

üstün olduğu belirlenmiştir (Abeykoon v.d., 2020; Dhinesh v.d., 2020; Lay v.d., 2019). Örneğin ABS polimerinin farklı katman kalınlıklarında çekme dayanımının incelenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara göre katman kalınlığı arttıkça malzemelerin mekanik özelliklerinde azalım gözlemlendiği görülmüştür. 0,09 mm katman kalınlığında ABS'nin maksimum çekme dayanımı özelliği verdiği belirlenmiştir (Khabia ve Jain, 2019). Buna ilaveten, PLA'nın çekme ve basma özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili farklı iç doluluk oranlarına sahip numuneler incelenerek çalışmalar yapılmıştır. İç doluluk oranlarındaki değişim (%10-25-40-50-60-75-100 gibi) malzemenin hafifliği bakımından büyük bir fayda sağlamaktadır. Ancak, araştırmalara göre iç doluluğu %100 olmayan numuneler %100 olan numunelere göre düşük mekanik özellikler sergilemektedirler. Bundan dolayı 3d yazıcı çalışmalarında genellikle %100 doluluk oranında çalışmalar yapılmaktadır. Bununla birlikte farklı iç doluluk oranına sahip numuneler, üzerine fazla yük binmeyen yataklarda kullanılabilir (Abeykoon v.d., 2020; Buj-Corral v.d., 2019; Srinivasan v.d., 2020).

2.2. Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Polimerler ve Bu Polimerlere Toz Katkılandırılması

Polimerler (özellikle termoplastik özelliğe sahip olanlar) ısıya maruz kaldıklarında kolay şekil verilebilme özelliklerinden ötürü 3d yazıcı teknolojisinin önemli hammaddeleri olmuşlardır. Kolay şekil verilebilen bu malzemeler, mekanik özelliklerinin her ne kadar metaller veya seramikler kadar yüksek eğilimde olmasa da ticari kullanım alanlarında elverişli ve uygulanabilir olmasından dolayı (fazla yüke veya yorulmaya maruz kalmayan sistemler) piyasada kullanılmaya başlanmış ve hayatımızın her alanında (arabalar, uçaklar, mutfak gereçleri, paketler, şişeler v.b.) yerini almıştır.

Polimerlerin 3d yazıcıda kullanılabilmesi için öncelikle 3d yazıcının ana malzemesi olan filament formuna dönüştürülmesi gerekmektedir. İlk olarak polimerler granül adı verilen boncuk şeklinde küresel formda veya toz formunda hazırlanmaktadırlar. Daha sonra ekstrüder adı verilen filament çekme sistemi ekipmanı içerisine aktarılmaktadırlar. Polimerler, ekstrüder içerisinde ısıtılarak (180 - 350°C) istenilen çap uzunluğuna (1,75 mm; 2,85 mm) göre belirli hızda (10 - 100 rpm) çekilir ve filament form elde edilir. Daha sonra filamentler FDM yönteminde kullanılarak nihai ürün elde etmek üzere 3d yazıcılara yönlendirilmektedir.

FDM ile farklı türde malzemelerin kullanılabilir olması sektörlerde ihtiyaca yönelik farklı malzeme arayışlarını ve malzemelerin geliştirilmesine yönelik çalışmaları başlatmıştır. Geleneksel yöntemlerde kompozit malzemelerin üretimi farklı metal tozların karışımı ile gerçekleşirken FDM yönteminde termoplastik matrislere karbon fiber, grafen, cam elyaf gibi katkıların ilavesi ile ekstrüzyon yönteminde gerçekleştirilmektedir (Karaman ve Çolak, 2019).

Polimerlere mekanik özelliklerinin arttırımı için toz katkılandırma işlemi, kullanım alanına göre metal veya seramik olarak farklılık göstermektedir. Polimerlere toz katkılandırma işlemi polimerlerin mekanik özelliğini arttırabildiği gibi, katkılandırma yüzdesindeki olağan üstü artışlar mekanik özelliklerde ciddi azalma gösterebilmektedir. Yani toz ilave işlemi mekanik özellikler ile doğrusal bir ilişki göstermez. Polimer yapıdaki malzemelerin birçoğunun mekanik özelliklerinin, gerek metaller, gerekse seramiklere kıyasla daha mütevazı değerler sergilemesi, bu yapıları farklı kompozitler halinde, farklı karışım yüzdeleri ve boyutları ile kullanmayı gerekli hale getirmiştir. Polimerlerin tercih edilme sebepleri hafiflik, yüksek elastiklik, biyouyumluluk olarak sıralanabilir (Magar v.d., 2018; Sezer ve Eren, 2019; Venkatesh v.d., 2019; Wu v.d., 2020). Çizelge 2.1’de polimerlerin içerisine yaygın olarak katkılandırılan tozlar listelenmiştir.

Çizelge 2.1. Polimerler içerisine katkılandırılan tozlar

Katkılandırılan Tozlar	
Metal Tozlar	Aluminyum ve alaşımları
	Titanyum ve alaşımları
	Çelik ve alaşımları
	Magnezyum ve alaşımları
	Bakır
	Gümüş
	Nikel
Seramik Tozlar	Karbon fiber
	Silisyum ve bileşikler
	Bor ve bileşikler

Filament üretimini gerçekleştiren ekstrüderlerin ticari olarak vida sayısına göre tek vidalı ve çift vidalı şeklinde adlandırılan ve akademik alanda sıklıkla kullanılmakta olan 2 farklı türü mevcuttur. Tek vidalı ekstrüderler çalışma prensibi olarak haznesine eklenen malzemeyi vida aracılığıyla, önceden ısıtılmış olan nozul ucuna iletmektedir. Nozul ucundan filament

çekilmesi gerçekleştirilmektedir. Hassasiyet bakımından üstün kabiliyetlere sahip olan tek vidalı ekstruderler tek tip filament üretimi için piyasada çokça tercih edilmektedir. Buna ilaveten çift vidalı ekstruderlerde ise içerisinde 2 adet vida bulundurmaktadır. 2 vidanın kapalı bir hacimde birlikte eş yönlü veya zıt yönlü olarak çalıştırılması, hazne içerisinde bir karışım odası oluşmasını sağlamaktadır. Böylece çift vidalı ekstruderler içerisinde 2 veya daha fazla polimer veya tozun karıştırılması ve oluşan karışımdan filament üretilmesi istenilen hız ve sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Buna ilaveten çift vidalı ekstruderlerin kapasitesi, hassasiyeti ve nihai ürün verimi tek vidalı ekstruderlerden daha yüksektir.

Literatüre bakıldığında, 3d yazıcılarda kullanılan filamentlerin (PLA, ABS, PEEK) tek veya çift vidalı ekstruder kullanılarak üretiminin gerçekleştirilmesi incelenebilir. Yukarıda anlatıldığı gibi gerçekleştirilen çift vidalı ekstruderler içerisinde toz katkılı filament üretimi dışında homojenizasyonun daha iyi sağlanabilmesi için kimyasal çözündürme yöntemi ile karışım oluşturma metotları bulunmaktadır. Bu süreç şu şekilde açıklanabilir. Öncelikle seçilen polimer (PLA, ABS) güçlü bir kimyasal çözücü (DCM, THF) ile kapalı bir kap (reaktör) içerisinde (24 saat, 40°C sıcaklık) karıştırılır. Daha sonra homojen karışım sağlanması bakımından ilave edilecek toz (Al_2O_3 , SiOC, BN), polimeri çözünen bu kapalı kap içerisine azar azar ilave edilir. Tekrar belirli bir süre karıştırılır. Bu işlem önceden belirlenmiş kütle oranlarına (%1, %5, %10 v.b.) göre gerçekleştirilir. Homojen karışım sağlandığında çözelti kapalı kap içerisinden alınarak vakumlu bir ortama alınır. Bu ortamda çözücü kimyasal çözeltiden uzaklaştırılır. Daha sonra kurutma işlemi gerçekleştirilerek kompozit malzemenin içerisindeki sıkışan hava veya kimyasal maddeler tamamen sistemden uzaklaştırılır. Bu süreç PLA ve SiOC karışımı içeren bir çalışmaya göre 70°C’de 4 saat bekletilmek ile olur. Daha sonra kurutulmuş kompozit malzeme, polimer – metal/seramik kompozitler, filament üretimi için bir bilyalı değirmende oda sıcaklığında 4 saat kadar öğütülür. Öğütülmüş numuneler, ekstrudere gönderilir. Filament çekimi gerçekleştirilir (Byrley v.d., 2020; Geng v.d., 2019; Liu v.d., 2018). Literatürde, PLA’ya farklı malzemeler katkılандırılmış ve bu malzemelerin PLA’nın özelliklerine etkisi incelenmiştir. Katkılандırılan malzemelerden bazıları örnek olarak Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. PLA içerisine katkılanırılan tozlar

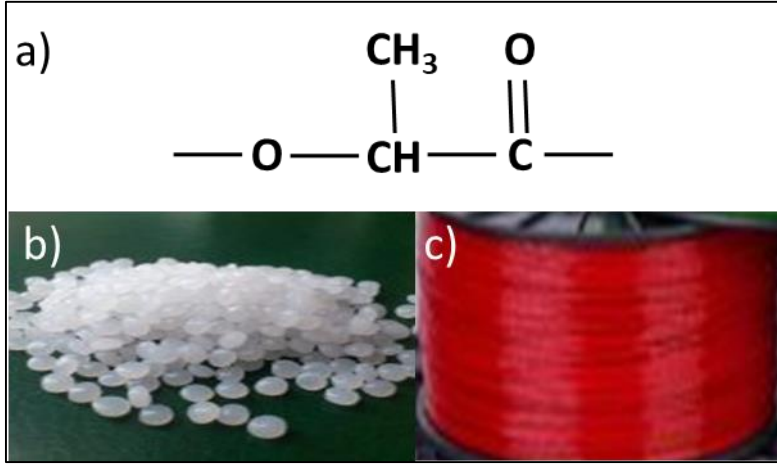
NO	Karışım	Kütlece Yüzde		Referanslar
1	PLA-AlN	PLA %70	Aluminyum Nitrür %30	(Lule ve Kim, 2019)
2	PLA-HAP	PLA-%95	HAP-%5	(Prasad v.d., 2017)
3	PLA-MNC	PLA-%90	Selüloz-%10	(Wang v.d., 2017a)
4	PLA-HNT	PLA-%97	Halloysit-%3	(Risyon v.d., 2020)
5	PLA-Cu / PLA-Br / PLA-Ag	PLA %30 / %35 / %96	Bakır %70 / Bronz %75 / Gümüş %4	(Alam v.d., 2020)
6	PLA-CNT	PLA %95,7	Karbon Nanotüp %4,3	(Yu v.d., 2019a)
7	PLA-CaCO ₃	PLA %95-80	Kalsiyum Karbonat %5-20	(Aliotta v.d., 2019)
8	PLA-CF	PLA-%60	Karbon Fiber-%40	(Liu v.d., 2019)
9	PLA-PEG	PLA %90	Polietilen Glikol %10	(Carlier v.d., 2019)
10	PLA-PS	PLA %75	Polisitren %25	(Hamad v.d., 2016)
11	PLA-PPC	PLA %85	Polipropilen Karbonat %15	(Haneef v.d., 2019)
12	PLA-Thy	PLA %86,5-79,5	Timol %13,5-20,5	(Torres v.d., 2017)
13	PLA-Bazalt	PLA %90	Bazalt %10	(Yu v.d., 2019b)
14	PLA-Mg	PLA %50	Magnezyum %50	(Ferrandez-Montero v.d., 2020)
15	PLA-Omt	PLA %94	Kil %6	(Alves v.d., 2019)
16	PLA-TiO ₂	PLA %33,3	Titanyum Oksit %66,6	(Mallick v.d., 2018)
17	PLA-Ca ₃ (PO ₄) ₂	PLA %95	Kalsiyum Fosfat %5	(Montjovent v.d., 2008)
18	PLA-BAG	PLA %70	Cam %30	(Houaoui v.d., 2020)

3d yazıcılarda kullanılan başlıca polimerler şunlardır:

Polilaktik asit (PLA)

3d yazıcı dünyasında kullanılan en yaygın 2 filamentten biri PLA'dır. PLA mısır nişastası ve şeker kamışından üretilen organik ve biyobozunur bir polimerdir. Toprağa gömüldüğünde doğada kaybolma süresi 3 aydır. Dolayısıyla insan sağlığına zararlı değildir. Bu özelliği PLA'yı biyomedikal alanında kullanılabilir hale getirmiştir. Ayrıca, PLA, streç filmler, mimari modeller, plastik şişe ve kaplarda kullanılabilir olmasıyla beraber, 3d yazıcı dünyasında farklı araştırma alanlarında (otomotiv, uzay ve havacılık gibi) da kullanılabilmektedir.

Resim 2.2'de, PLA'nın bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir. PLA'nın mekanik özellikleri üretimine göre içerdiği nem veya porozitesinden dolayı değişiklik göstermektedir. PLA'nın özellikleri; Elastik modül 2,3-2,4 GPa, molekül ağırlığı $1,5 \times 10^5$ g/mol, erime sıcaklığı 170-230°C, ayrıştırma sıcaklığı 250°C, yoğunluğu ise yaklaşık olarak 1,25 g/cm³ olarak bilinmektedir (Bindhu v.d., 2018; Tymrak v.d., 2014; Wu v.d., 2020). PLA polimeri genellikle otomotiv, biyomedikal ve elektrik-elektronik alanında ve kullanılmıştır. Buna ilaveten, farklı yazdırma oryantasyonları ve farklı üretim yönleri kullanılarak bir 3d yazıcının PLA malzemelerinin çekme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Biyobozunurluğu test edilmiştir. Toprağa gömülen bir numunenin tamamen toprağa karışma süresi 80 gündür (Corapi v.d., 2019). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, FDM yöntemi ile PLA polimer filamentinden nihai ürün eldesi, mekanik özellikleri ve mikroyapı analizleri çalışmaları bulunmaktadır.

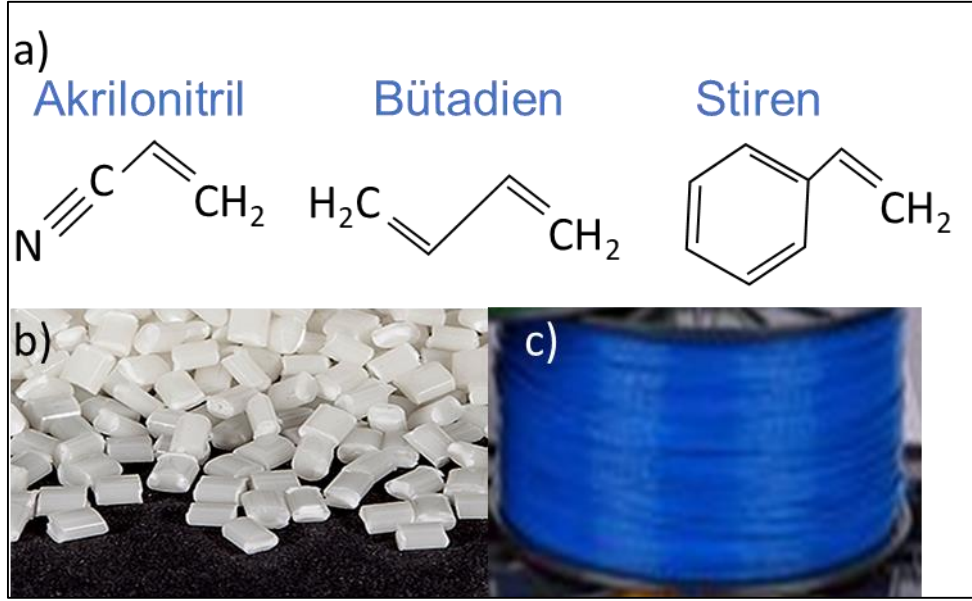


Resim 2.2. PLA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Artıboyut, 2021).

Akrilonitril bütadien sitren (ABS)

3d yazıcı dünyasında kullanılan en yaygın filament ABS'dir. Petrol bazlı bir termoplastik olan ABS biyomedikal alanında tercih edilemez. Ancak, yüksek mukavemetli olması ABS'yi mühendislik alanlarının çeşitli prototipleme çalışmalarında, otomotiv sanayisinde ve uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılabilir kılmaktadır.

Resim 2.3'te, ABS'nin bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir. ABS polimeri genellikle otomotiv sanayisinde kullanılmıştır (Yadav v.d., 2019). Üretilen numuneler üzerinden ABS polimerinin farklı 3d yazıcılardaki davranışı, farklı oryantasyon ve iç doluluklarında, farklı katman kalınlıklarında gösterdiği çekme dayanımı değerleri araştırılmıştır.

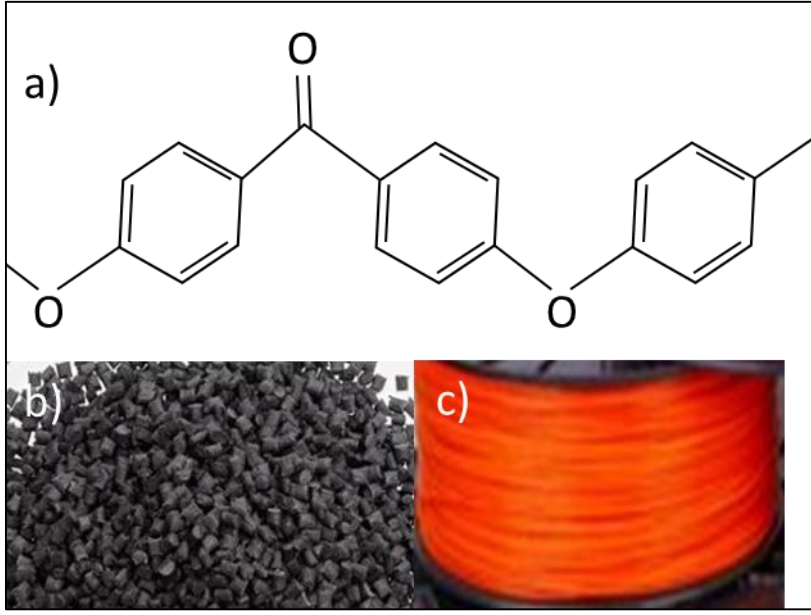


Resim 2.3. ABS: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Artıboyut, 2021).

Polieter eter keton (PEEK)

Polimerler arasındaki en üstün mekanik özelliklere sahip olan PEEK polimeri, biyouyumluluk özelliğini de bünyesinde bulundururarak biyomedikal sektöründe önemli bir malzeme olarak kendisine yer edinmiştir.

Resim 2.4'te, PEEK'in bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir. PEEK polimeri genellikle biyomedikal endüstrisinde kullanılmaktadır. Üretilen numuneler üzerinden PEEK polimerinin çekme dayanımı farklı üretim hızı, katman kalınlığı, doluluk oranı ve farklı nozul sıcaklıklarında üretimler yapılması ile araştırılmıştır.

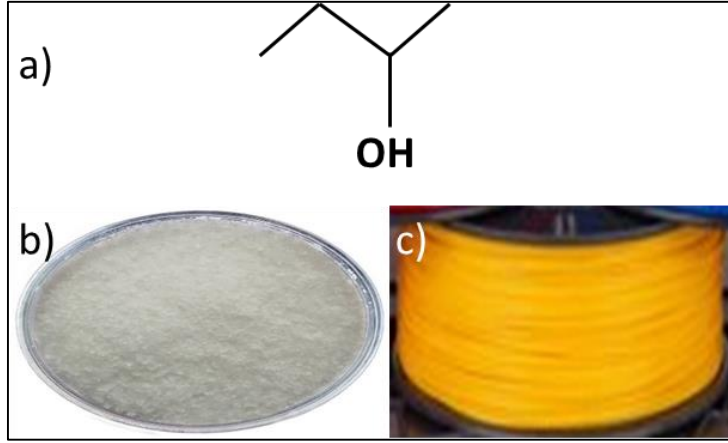


Resim 2.4. PEEK: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Plastdepo, 2020).

Polivinil alkol (PVA)

PVA suda çözünebilen ve mekanik özellikleri oldukça düşük olan bir polimerdir. Bundan dolayı 3d yazıcılar için destek malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, literatürde PVA'nın ilaç ve eczacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

Resim 2.5'te, PVA'nın bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir. PVA, genellikle biyomedikal, dişçilik ve ilaç sanayisinde kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinden PVA filamentleri geliştirilmiş ve biyobozunur özellikleri araştırılmıştır. 80 MPa çekme dayanımına sahip olan PVA filamentleri gün geçtikçe dayanımını kaybetmekte ve 3 ay sonunda bu polimer tamamen doğada kaybolmaktadır. Ayrıca, damar stentleri ve diş kaplamaları üretimi de FDM yöntemi ile PVA filament kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Macedo v.d., 2020; Muta v.d., 2020; Park v.d., 2021).

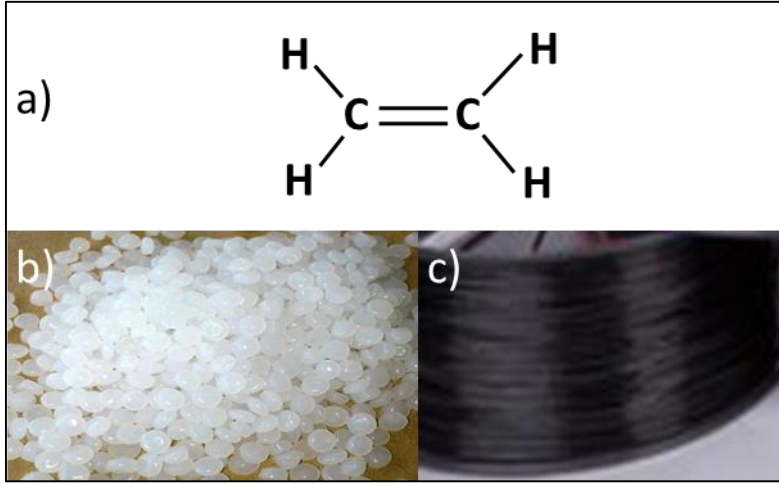


Resim 2.5. PVA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Katkıdeposu, 2021).

Polietilen (PE)

Yiyecek ve içecek kaplarının tasarımında kullanılan PE filament ABS ve PLA ile kıyaslanabilir özelliklere sahiptir. PE filament, ABS'den daha güçlü olup, PLA'dan daha kolay yazdırılabilir özelliktedir. PE ise düşük sertlik değerine sahiptir. Bu durum, 3d yazıcı içerisindeki filament besleme sisteminde büyük problemlere sebep olmaktadır. Bundan dolayı PE filamentinin 3d yazıcıda kullanımı kısıtlıdır (Evlen, 2019).

Resim 2.6'da, PE'nin bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir.

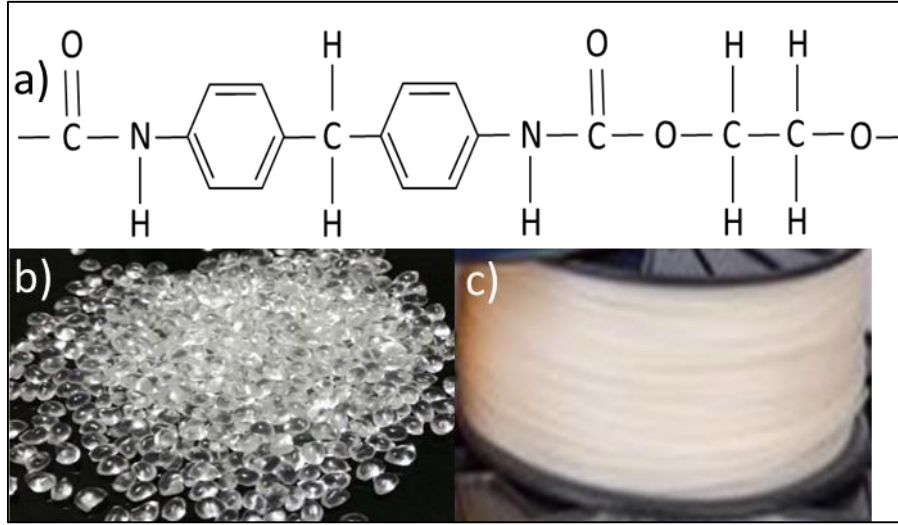


Resim 2.6. PE: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Xiamen Keyuan).

Poliüretan (PU)

PU veya TPU, termoplastik yapıya sahip, kullanışlı bir polimerdir. Esnek bir polimer olan PU diğer esnek malzemeler ile kıyaslandığında basımı oldukça kolaydır. Yüksek sertlik ve dayanıklılıktan dolayı mekanik parça üretiminde sıklıkla tercih edilen PU, biyouyumlu olmayışı sebebiyle kullanım alanı kısıtlanmaktadır. TPU'nun 3d yazıcılar için filament olarak tercih edilmesinin en önemli sebebi, dayanıklı, ekonomik ve kullanışlı olmasıdır. Çekme/kopma mukavemeti düşük, ısı dayanımı ise yüksektir. Toksik madde içermediğinden üretim, uygulama ve kullanım esnasında insan sağlığına zarar verme potansiyeli düşüktür. Ayakkabı tabanı, terlik, boru, kablo ve elektrik malzemeleri, telefon kılıfı ve kemer gibi ürünlerle birlikte esneklik ve yüksek dayanım gerektiren tüm parçaların imalatında kullanılabilir. (Evlen, 2019; Karaman ve Çolak, 2019) İlginç bir çalışma ise inşaat sektöründe kullanılmak üzere TPU/beton kompozitidir. FDM yöntemi ile ev inşaatında kullanılabilirlik açısından yenilikçilik arz etmektedir (Furet v.d., 2019).

Resim 2.7'de, PU'nun bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir.

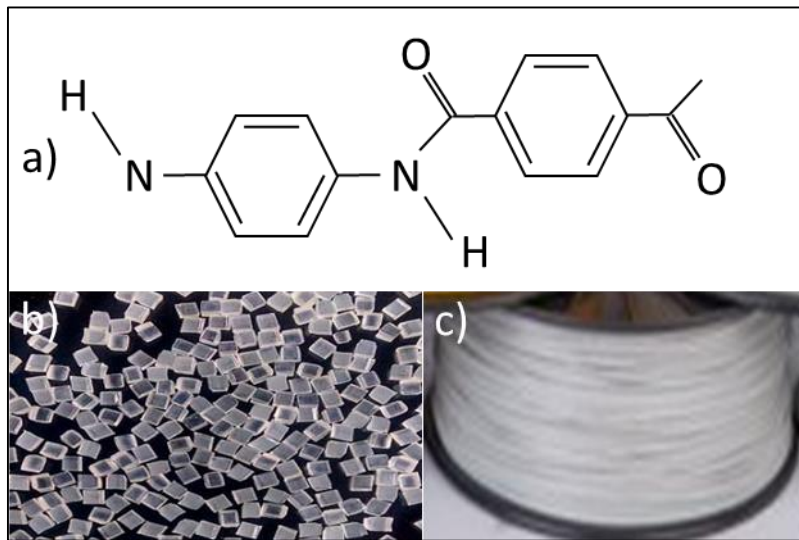


Resim 2.7. PU: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Plastdepo, 2020).

Poliamit (PA)

Diğer bir polimer olan PA, oldukça esnek bir naylon olup, parlaklık, esneklik ve mükemmel yüzey kalitesi özelliklerinden dolayı spor malzemelerinde (kayak takımı, golf topu) kullanılmaktadır.

Resim 2.8’de, PA’nın bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir.

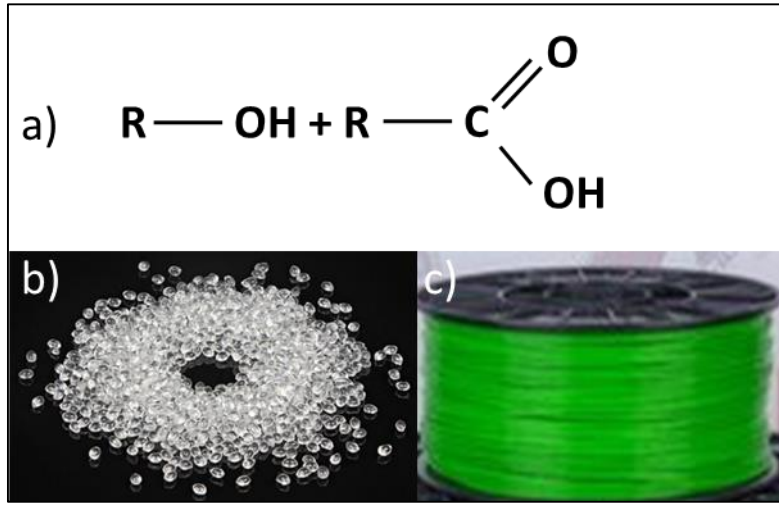


Resim 2.8. PA: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Plastdepo, 2020).

Polyester

Bünyesinde hem sert hem yumuşak özellik bulundurmasından dolayı kendiliğinden genişleyen polimer stentlerde kullanılan polyesterler, genelde 3d yazıcı dünyasında yaygın olarak kullanılmamaktadır. Ancak, Ar-Ge amaçlı kullanımları mevcuttur.

Resim 2.9'da, Polyesterin bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir.

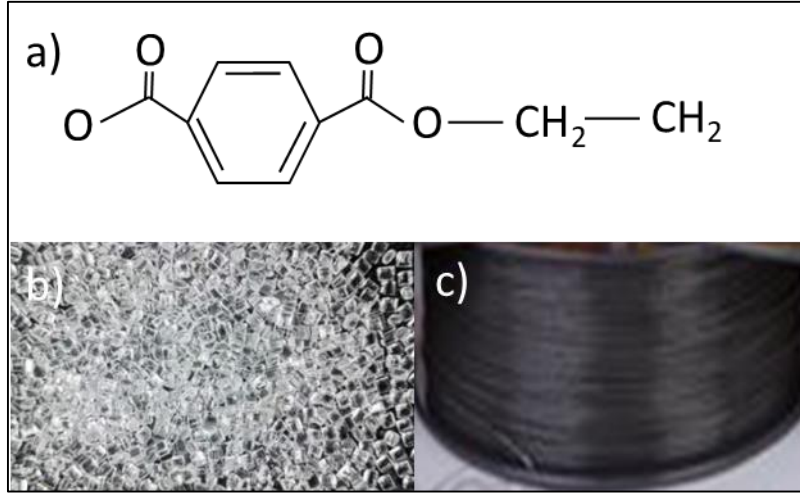


Resim 2.9. Polyester: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Xiamen Keyuan).

Polietilen tereftalat (PETG)

PETG termoplastik bir malzemedir. Yiyecek ve içecek paketleri ve sentetik fiberler gibi kullanım alanları vardır. ABS'den daha güçlü ve esnek bir yapıya sahiptir. Basımı PLA gibi kolaydır ve tamamen geri dönüştürülebilmektedir.

Resim 2.10'da, PETG'nin bağ yapısı, filament haline getirilmeden önceki granül formu ve FDM yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan filament formu gösterilmektedir.



Resim 2.10. PETG: a) Molekül yapısı; b) Granül form; c) Filament form (Boyutkat, 2021).

Detaylı olarak listelenen bu polimerlerin, eklemeli imalat yönteminde kullanımı birbirinden farklıdır. Öyle ki, her polimer ısııl veya mekanik özelliklerindeki bağımsızlığından dolayı 3d yazıcılarda farklı parametrelerde kullanılmaktadırlar. Buna göre Çizelge 2.3'te FDM yönteminde kullanılan polimerlerin temel özellikleri ve bu yöntemde tercih edilme sebepleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. 3d yazıcıda kullanılan polimerler ve kullanım nedenleri

Polimer	Temel Özellikleri
PLA	Baskı sıcaklığı 190°C – 220°C
	Tabla sıcaklığı 50°C – 70°C
	Kalkma ve çatlama problemi yok.
	Sert ve darbelere karşı dayanıklı
	Kırılgan
	Suda çözünmez
ABS	Baskı sıcaklığı 230°C – 250°C
	Tabla sıcaklığı 80°C – 100°C
	Kalkma ve çatlama problemi olabilir.
	Sert ve darbelere karşı dayanıklı
	Kırılgan
	Suda çözünmez

Çizelge 2.3.(devam) 3d yazıcıda kullanılan polimerler ve kullanım nedenleri

Polimer	Temel Özellikleri
PEEK	Baskı sıcaklığı 375°C – 450°C
	Tabla sıcaklığı 130°C – 145°C
	Mükemmel yalıtım, mükemmel sürtünme direnci
	Mükemmel deformasyon direnci
	Suda çözünmez
PVA	Baskı sıcaklığı 170°C – 190°C
	Tabla sıcaklığı 50°C – 70°C
	Kalkma ve çatlama problemi yoktur.
	Kırılğan
	Suda çözünür
	En iyi destek malzemesidir
TPE	Baskı sıcaklığı 220°C – 250°C
	Tabla sıcaklığı 60°C – 70°C
	Kalkma ve çatlama problemi yoktur.
	Dayanıklı ve darbelere karşı dirençli, Esnektir
	Suda çözünmez
TPU	Baskı sıcaklığı 210°C – 230°C
	Tabla sıcaklığı 60°C – 70°C
	Kalkma ve çatlama problemi yoktur.
	Dayanıklı ve darbelere karşı dirençli, Esnektir
	Hafif
	Suda çözünmez
PA	Baskı sıcaklığı 220°C – 230°C
	Tabla sıcaklığı 30°C – 60°C
	Kalkma ve çatlama problemi yoktur.
	Dayanıklı ve darbelere karşı dirençli, Esnektir
	Hafif
	Suda çözünmez
Polyester	Baskı sıcaklığı 220°C – 260°C
	Tabla sıcaklığı 90°C – 110°C
	Yüksek güç
	Kırılğandır, hafiftir
	İyi kimyasal direnç ve ısı kararlılık
	Suda çözünmez
PETG	Baskı sıcaklığı 220°C – 250°C
	Tabla sıcaklığı 60°C – 70°C
	Kalkma ve çatlama problemi çok az
	Sert ve darbelere karşı dayanıklı
	Oldukça esnektir
	Suda çözünmez

Tüm bu polimerlerin kullanımına literatürde oldukça sık rastlanmaktadır. Buna göre incelenen literatür örnekleri Çizelge 2.4'te FDM yönteminde kullanılan polimerlerin literatür araştırmaları verilmektedir.

Çizelge 2.4. Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler

Malzeme	Kullanım Alanı	Çalışma	Analiz	Sonuç	Referans
PLA	Otomotiv, biyomedikal, elektrik-elektronik endüstrisi	PLA içerisine karbon nanotüp ilavesi	Çekme testi	Kütlece %6 oranındaki bir karışım için PLA'nın çekme dayanımı 42 MPa'dan 68 MPa'ya çıkarak %62 oranında artmıştır.	Yang v.d., 2019a
		3d yazıcı parametrelerinin (iç doluluğu ve iç dolgu deseni) mekanik özelliklere etkisi	Çekme/eğme testi OM	En iyi mukavemet değeri %82 gibi büyük bir farkla elmas iç dolgu deseninde gözlemlenmiştir.	Lubombo ve Huneault, 2018
		3d yazıcı parametrelerinin (baskı yerleşimi ve katman kalınlığı) mekanik özelliklere etkisi	Çekme testi	Çekme deneyi sonucu katman kalınlığındaki artışın çekme dayanımını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, baskı yerleşimi açısından artış, çekme dayanımını arttırmaktadır.	Yao v.d., 2019
		3d yazıcıların farklı yerçekimsel ortamlarda kullanımı	Çekme/basma testi OM ve SEM	1 g'ye kıyasla 0-2 g değişken yer çekiminde mekanik özellikleri %8 azalmıştır.	Cowley v.d., 2019
		Kimyasal yüzey temizlemenin mekanik özelliklere etkisi	Çekme testi	Diklormetan (DCM) banyosu çekme sonuçlarını %64 düşürmüştür.	Jin v.d., 2017

Çizelge 2.4. (devam) Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler

Malzeme	Kullanım Alanı	Çalışma	Analiz	Sonuç	Referans
PLA	Otomotiv, biyomedikal, elektrik-elektronik sanayileri	3d yazıcı parametrelerinin (katman kalınlığı, baskı yerleşimi ve üretim hızı) mekanik özelliklere etkisi	Çekme testi	0,06 mm kalınlık, 50 mm/s üretim hızı ve düz yerleşimde çekme mukavemetinin en yüksek değere ulaştığı görülmüştür.	Chacón v.d., 2017
		PLA granüllerinden farklı nem oranlarında filament eldesi	Farklı sıcaklıklarda çekme testi DSC, XRD, OM, FTIR ve SEM analizleri	Sıcaklık artışı, çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Filament çapı daraldıkça çekme dayanımı ve elastik modülde artış seyretmektedir (çekme dayanımı için %740 ve elastik modül için %100). Buna ilaveten, nem yüzdesindeki artış bu değerleri cüzi miktarda düşürmektedir. %98 nem altında, 11 µm çap için %10 azalım. Bu değerler 38 µm için, %12 azalım.	Hossain v.d., 2014
ABS	Otomotiv sanayisi	3d yazıcı parametrelerinin (katman kalınlığı, baskı yerleşimi ve iç doluluklarda) mekanik özelliklere etkisi	Çekme testi	Katman kalınlığı azaldıkça mekanik özelliklerde artış gözlemlenmiştir (%29).	Khabia ve Jain, 2019
		3d yazıcı ile üretilen ABS numunelerinin PLA ile karşılaştırılması	Çekme testi	ABS'nin elastik modülü PLA'dan %11 düşük sonuç vermiştir. Ayrıca, çekme dayanımı %9 düşük sonuç vermiştir. Buna göre PLA, ABS'den mekanik olarak iyidir.	Salim v.d., 2019
		ABS ile karbon fiber kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	%20 karbon fiber katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf ABS değerlerine göre arttırmıştır.	Sezer v.d., 2016
		ABS ile karbon fiber kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	%10 karbon fiber katkısı çekme dayanımı (%33) ve elastik modül (%158) değerlerini, saf ABS değerlerine göre arttırmıştır.	Sezer v.d., 2017
		ABS ile karbon fiber kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	%15 karbon fiber katkısı çekme dayanımı (%30) ve elastik modül (%158) değerlerini, saf ABS değerlerine göre arttırmıştır.	Sezer v.d., 2018

Çizelge 2.4. (devam) Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler

Malzeme	Kullanım Alanı	Çalışma	Analiz	Sonuç	Referans
ABS	Otomotiv sanayisi	ABS ile paslanmaz çelik kullanılarak kompozit numune üretimi	Çekme testi	%10 paslanmaz çelik katkısı çekme dayanımı (%5) değerini, saf ABS'ye göre düşürmüştür.	Ryder v.d., 2018
		ABS ile karbon nanotüp kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	Karbon nanotüp katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf ABS değerlerine göre arttırmıştır.	Eren ve Sezer, 2019
		ABS ile grafen kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	Grafen katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf ABS değerlerine göre arttırmıştır.	Singh ve Kumar, 2020
		ABS ile MnAlC kullanılarak somun gibi mekanik manyetik sızdırmazlık elemanları üretimi	Çekme testi	%78,4 katkılandırma sonucu, elastik modül 367,8 MPa çekme dayanımı 3,4 MPa olarak belirlenmiştir.	Palmero v.d., 2020
		ABS ile TiO ₂ kullanılarak mekanik ekipman üretimi	Çekme testi	%10 katkılandırma sonucu, çekme dayanımı 18,1 MPa olarak belirlenmiştir.	Tiwary v.d., 2020
PEEK	Biyomedikal endüstrisi, Elektrik-elektronik sanayi	Farklı baskı sıcaklıklarında FDM ile numune üretimi	Çekme testi	380°C de baskılandırılan bir çekme numunesinin çekme dayanımısıcaklık arttıkça artmıştır (420°C de %6).	Ding v.d., 2019
		PEEK ile karbon fiber kullanılarak kompozit üretimi	Eğme testi	%10 karbon fiber katkısı eğme dayanımı (%24) değerini ve eğme modülü (%25) değerini saf PEEK' e göre arttırmıştır.	Huang v.d., 2020
PVA	Biyomedikal , dişçilik ve ilaç sanayisi	PVA ile Tween 80 kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	%25 Tween 80 katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Alhijaj v.d., 2016
		PVA ile Carvediol kullanılarak ilaç üretimi	Çekme testi	%10 Carvediol katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Wei v.d., 2020a
		PVA ile gliserol kullanılarak ilaç üretimi	Çekme testi	%5 Gliserol katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Melocchi v.d., 2016

Çizelge 2.4. (devam) Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler

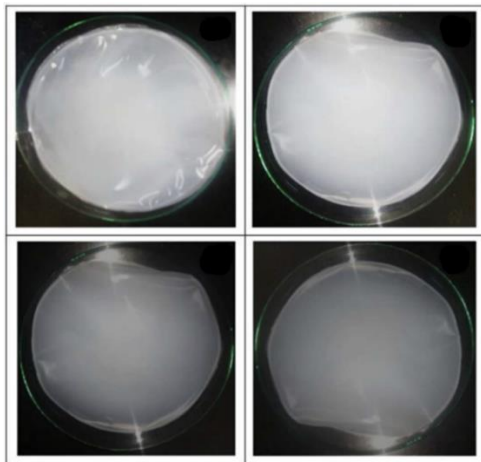
Malzeme	Kullanım Alanı	Çalışma	Analiz	Sonuç	Referans
PVA	Biyomedikal , dişçilik ve ilaç sanayisi	PVA ile HCl kullanılarak ilaç üretimi	Çekme testi	%10 Gliserol katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Saviano v.d., 2019
		PVA ile PEG kullanılarak ilaç üretimi	Çekme testi	%31,5 Gliserol katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Tagami v.d., 2019
		PVA ile HA kullanılarak ilaç üretimi	Çekme testi	%52 Gliserol katkısı çekme dayanımı ve elastik modül değerlerini, saf PVA değerlerine göre arttırmıştır.	Chai v.d., 2020
TPE/PE	Yiyecek ve içecek kaplarının tasarımı, Elektronik ekipmanlar	PE ile karton tozu kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme/basma/eğme testi FTIR SEM	Saf PE'nin yoğunluğu katkılandırma sonrası azalmıştır (%54). Aynı koşullarda üretilen filament çapı (%35) kalınlaşmıştır. Ayrıca, camsı geçiş sıcaklığı (%22) azalmıştır. Ek olarak, çekme dayanımı (%88) ve elastik modülde (%70) de ciddi oranda azalma gözlemlenmiştir.	Gregor-Svetec v.d., 2020
		PE ile grafen kullanılarak nanokompozit filament üretimi	Çekme testi	Öğütme yapılarak gerçekleştirilen üretim, öğütmesiz üretime göre mekanik özellikleri arttırmıştır.	Jing v.d., 2020
		PE ile SiC/Al ₂ O ₃ kullanılarak perçinleme raptiyesi üretimi	Çekme testi	22,2 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir.	Singh v.d., 2018
TPU/PU	Mekanik parça üretimi	Farklı iç doluluk oranlarında FDM ile numune üretimi	Çekme/basma testi	İç doluluk oranı arttıkça mekanik özellikler artmıştır.	Evlen, 2019
		PU ile karbon nanotüp kullanılarak Şekil hafızalı malzeme üretimi	Çekme testi	Çekme deneyi sonuçları TPU'nun 40 MPa çekme dayanımı ve 12 MPa elastik modüle sahip olduğunu göstermektedir.	Bi v.d., 2020
PA	Otomotiv, uzay ve havacılık sanayi	PA ile karbon fiber kullanılarak kompozit filament üretimi	Çekme testi	Çekme dayanımı saf PA'ya göre %88 artış göstermiştir.	Zhang v.d., 2020a
Polyester	Kendiliğinden genişleyen stentler	Soya ilaveli doğal kompozit fiberlerin FDM yöntemi ile üretimi	Çekme testi	Soya ilavesi sonucu elastik modül %50, tokluk %15 ve çekme dayanımı %27 artmıştır.	Balla v.d., 2020

Çizelge 2.4. (devam) Literatürde FDM yönteminde kullanılan polimerler

Malzeme	Kullanım Alanı	Çalışma	Analiz	Sonuç	Referans
PETG	Sentetik fiber üretimi	Katmanlar arası çekme mukavemetini iyileştirmek için PETG içerisine karbon fiber katkılanması	Çekme testi DSC SEM	Saf PETG'ye göre katmanlar arası çekme mukavemeti karbon fiber kompozit numunede azalmıştır (%66). Bu nedenle camsı geçiş sıcaklığından yüksek sıcaklıkta tavlama uygulanarak gerilme geri kazanılmıştır. Bu sayede kompozitin çekme mukavemeti %200, elastik modülü %65 artmıştır.	Bhandari v.d., 2019

2.3. Bor Katkılı Kompozit Malzemeler

Beyaz grafit olarak bilinen hegzagonal bor nitrür (h-BN) kolay işlenebilir olmasından dolayı ticari alanda ve araştırma geliştirme alanlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ek olarak h-BN, yüksek ısı iletkenliği, yüksek kimyasal kararlılık, yüksek yalıtım özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı ısı, elektronik veya optik alanlarında kullanılabilir. Bor nitrür olarak h-BN, kübik bor nitrüre (c-BN) göre ucuzluk, yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi işlenebilirlik özelliklerinden dolayı piyasada sıkça tercih edilmektedir. h-BN'nin özellikleri; yoğunluk $2,27 \text{ g/cm}^3$, erime sıcaklığı 2700°C , oksitlenme sıcaklığı 980°C 'dir (Ghaffari v.d., 2015; Kumar v.d., 2017; Öz, 2016). Resim 2.11'de PLA/h-BN kompozitlerinin çözücü döküm yöntemi ile eldesine ait numuneler gösterilmektedir.



Resim 2.11. THF ile karıştırılıp kurutulmuş olan PLA/h-BN kompozitleri (Ghaffari v.d., 2015)

2.3.1. Bor nitrür ve PLA kompozitleri

Bor nitrür kübik olarak veya hegzagonal olarak bulunmaktadır. c-BN elmastan sonraki en sert malzemedir (30-43 GPa) ve mükemmel sertlik ve aşınma direnci özelliği göstermekte olup otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılan işlenmesi zor parçaların işlenmesinde (kesici takımlarda) kullanılmaktadır (Besharatloo v.d., 2019; Yin v.d., 2020). Ayrıca, c-BN'lerin tribolojik (sürtünme, aşınma ve yağlayıcılık özellikleri) performansları da yüksektir. Bu nedenle kaplamacılıktada kullanılmaktadır (Zhao v.d., 2019). Ayrıca, c-BN'nin kütlece %2-5-7-10 oranlarında ilavesi sonucu malzeme tokluğunun, yoğunluğunun ve mukavemetinin arttığı ancak, sertlik ve elastik modülünün azaldığı gözlemlenmiştir (Sun v.d., 2020). c-BN sertlik açısından elmastan sonra gelmesine rağmen elmastan üstün özellikler barındırmasından ötürü kesici takımlarda tercih edilmektedir. Bunlar; kimyasal tepkisizlik ve termal stablitedir. Yani elmas 600°C'de yanar ve demirde yüksek sıcaklıklarda çözünebilir ancak, buna rağmen c-BN ise 1200°C'ye kadar demir ile reaksiyona girmez. Ayrıca, c-BN 1200°C'ye kadar bu yüksek sertlik özelliğini koruyabilmektedir (Chong v.d., 2009).

h-BN, yalıtım performansı nedeniyle biyogörüntüleme, kapsüllemede ve radyasyondan korunma çalışmalarında kullanılmaktadır (Güngör v.d., 2019; Shi v.d., 2019; Yola ve Atar, 2019). Yüksek ısı iletkenlik özelliği nedeniyle h-BN'nin malzemelere %5-10-15-20 oranlarında karıştırılması ısı iletkenliği düşük olan malzemelerin ısı iletkenliklerinin artmasına sebep olmaktadır (Huang v.d., 2019). Yüksek elektrik direnci, mükemmel oksidasyon direnci ve kimyasal tepkisizlik gibi etkileyici özellikler göstermesi nedeniyle, h-BN, özellikle hidrojen depolama, karbondioksit (CO₂) yakalama, su arıtma gibi enerji ve çevre yönleri için adsorbant olarak kullanılabilir (Xiong v.d., 2020). Kızılötesi frekanslarda mükemmel emilim sağlama özelliğinden ötürü h-BN, termal yayıcılar ve güneş pillerinde kullanılmaktadır (Wu, 2018). Ayrıca, h-BN kompozitleri güçlü plastisite davranışları göstermektedirler (Zhang ve Zhang, 2018). Buna ilaveten, düşük dielektrik sabiti, yüksek kimyasal tepkisizlik ve kararlılık özelliklerinden dolayı h-BN ultraviyole, optik ve elektronik alanında kullanılmaktadır (Zhai v.d., 2019).

Literatürdeki PLA/h-BN kompozit numuneleri olarak PLA'nın ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla yüksek ısı iletkenlik özelliğine sahip olan h-BN'nin ilavesi gerçekleştirilmiştir. Bu PLA/h-BN kompoziti aynı zamanda elektronik verimlilik açısından da iyi özellik gösterdiğinden, bu 2 durum göz önüne alınmış ve elektronik ambalajlama malzemesi olarak bu kompozitin kullanımı çalışılmıştır (Ghaffari v.d., 2015). Buna ek olarak yine bir çalışmada kontrollü bozunma özelliğine sahip olan PLA/h-BN kompozitleri mekanik, termal ve su içerisinde bozunma özelliklerinin tespiti elektron ışın yayılımı yöntemine tabi tutulmuştur. Burada mekanik özelliklerin artışı kütlece %5 h-BN ilavesinde en yüksek değerleri göstermiştir (PLA'nın çekme tokluğunun kütlece %5 oranında h-BN ilavesi sonucunda %48,56 oranında arttığı gözlenmiştir) (Kumar v.d., 2017). Yine bir PLA/h-BN kompozit çalışmasında PLA'nın mekanik özelliklerini arttırmak amaçlanmış ve kütlece %1 h-BN ilavesinin PLA'nın darbe dayanımını diğer karışım oranlarına kıyasla en yüksek ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir (PLA'nın darbe dayanımının kütlece %1 oranında h-BN ilavesi sonucunda %50,42 oranında arttığı gözlenmiştir) (Kumar v.d., 2018). Başka bir çalışmada PLA/h-BN kompozitleri çözelti döküm yöntemi ile bir ambalaj film şeklinde hazırlanmıştır. Burada da PLA'nın mekanik özelliklerine h-BN'nin etkisi çalışılmış olup kütlece %2 miktarda h-BN ilavesinin PLA'nın mekanik özelliklerini en fazla miktarda arttırdığı görülmüştür (PLA'nın çekme mukavemetinin kütlece %2 oranında h-BN ilavesi sonucunda %132 oranında arttığı gözlenmiştir) (Bindhu v.d., 2018). Literatürde, PLA içerisine h-BN'nin kütlece oranda karışım yüzdeleri olarak %1, 2, 5, 10, 15, 20, 33 oranlarında katkılandırma işlemi gerçekleştirilmiş ve bu katkılandırma işlemi az miktarda (%1, 2, 5) yapıldığı takdirde PLA'nın mekanik özelliklerinin yüksek miktarda artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir (Ghaffari v.d., 2015; Kumar v.d., 2017; Kumar v.d., 2018).

2.4. Kafes Yapılar ve Poisson Oranı

Bu tezde, kafes geometrili yapılar, bu yapıların birim hücreleri, bu hücrelerdeki farklı şekillenmeler, hücre boyutları ve kafes geometrilerin kenarlarını oluşturan dalların aç ve kalınlıkları incelenmektedir. Ayrıca, bu geometrilerin mekanik özelliklere etkisinin detaylı literatür araştırması bu başlık altında değerlendirilmiştir.

Polimerlerin termoplastik özelliği ise ısıya maruz kaldığında şekil verilebilir olduğunu göstermektedir. Bu nedenle polimerler 3d yazıcılarda sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. 3d yazıcı ile PLA filament olarak kullanılmış ve bu şekilde çeşitli karmaşık geometrilerde kafes yapılar üretilerek mekanik özellikleri incelenmiştir (Koepe v.d., 2018; Köllner v.d., 2019; Xu v.d., 2019; Ye v.d., 2020). İnce kenarlardan oluşan içi boş figürler, kafes geometrili yapıları temsil etmektedir. Bu yapılar, geleneksel yapılar ile kıyaslandıklarında aynı mekanik özellikleri bu yapılardan daha hafif bir biçimde karşılamaktadırlar. Yüksek hafiflik özellikleri ile beraber gösterdikleri yüksek mukavemet davranışları kafes geometrili yapıları önemli hale getirmiştir. Kafes geometrili yapılar, mühendislik malzemelerinde çok önemli bir yere sahiptir. Paketleme, taşımacılık, (yüksek ısı transferi özelliklerinden dolayı) ısı transferi ekipmanları, elektrik ve elektronik ekipmanlar (elektrik iletkenlik özelliklerinin iyi olması sebebiyle), akıllı filtreler ve sensörler gibi farklı mühendislik malzemeleri bunlardan bazılarıdır. Nihai ürün olarak bu yapılar, uçak kanat prototipi olarak kullanılabilirler. Ayrıca, bu yapılardan (yüksek kayma modülünden ve kompozit yapıların metallere göre daha hafif olmasından dolayı) kompozit uzay ekipmanları üretilebilmektedir. Ek olarak, kafes geometrili yapıların yüksek akustik özellikleri barındırması, bu yapıları gürültü azaltıcı ekipmanların üretiminde kullanılabilir hale getirmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda bu yapıların diğer yapılardan daha üstün mekanik özelliklere (yüksek hafiflik, yüksek sertlik, yüksek darbe direnci, yüksek mukavemet, yüksek enerji absorpsiyonu, yüksek çarpma veya ezilme mukavemeti ve yüksek termal iletkenlik gibi) sahip olduğu bulunmuştur. 1987 yılında bu yapılar üzerine yapılan ilk araştırma Lakes tarafından yapılmış olup, farklı kafes geometri yapılarına sahip poliüretan köpükler ve bunların gösterdiği üstün mekanik özellikler ile farklı Poisson oranları üzerinedir.

Poisson oranı, S. D. Poisson tarafından keşfedilen malzemelerin karakteristik bir özelliğidir. Üzerine kuvvet uygulanan tüm malzemeler bu kuvvete karşı bir reaksiyon gösterir. Malzeme bir eksenenden çekildiğinde bu eksenende uzama davranışı gösterirken, bu eksene dik olan diğer eksenende daralma durumu gösterir, bir eksenenden basıldığında ise bu eksenende daralırken diğer eksenende genişleme gösterir. Bu, malzemelerin Poisson oranı karakteristiği ile açıklanmaktadır. Hemen hemen tüm malzemelerin Poisson oranı 0,1 ile 0,5 arasındadır. Örneğin, altının Poisson oranı 0,42, çeliğin 0,3, seramik, cam ve yarı iletkenlerin 0,25 - 0,42 arasında değer göstermektedir. Kafes geometrili bazı yapılar, geometrileri nedeniyle Poisson oranında alışılmadık bir durum gösterirler. Bu durum, Poisson oranı tanımına ters düşmektedir. Yani bahsedilen yapılar, bir eksenenden çekildiklerinde, diğer eksenenden

genişleme veya bir eksenenden basıldıklarında diğer eksenenden daralma davranışı gösterirler. Poisson oranı ile bir zıtlık oluşturmamasından dolayı bu durum negatif Poisson oranı olarak adlandırılır ve bu özelliğe sahip malzemeler literatürde “Ökzetik” malzemeler olarak adlandırılmaktadır. “Ökzetik malzemeler” terimi ilk olarak Evans tarafından kullanılmıştır. Bilinen doğal ökzetik malzemelere, arsenik, kadmiyum, demir piritler, kedi derisi, semender derisi ve inek meme derisi gibi bazı derilerde, süngerimsi insan kemiklerinde rastlanmaktadır. Buna ilaveten kafes geometrilili yapılar dal açılarına göre, içbükey veya dışbükey şekilli geometrilere sahiptir. Genellikle dışbükey şekle sahip kafes geometrileri, pozitif Poisson oranlarına sahiptirler. İçbükey şekle sahip olanlar ise, negatif Poisson oranı özelliği göstermişlerdir. Ökzetik özellikteki kafes yapılar, ökzetik özellik göstermeyen kafes yapılar ile karşılaştırıldıklarında, yüksek sürtünme dayanımı, yüksek darbe enerjisi emilimi, yüksek ara yüzey dayanımı, yüksek kayma modülü ve kopma dayanımı özellikleri sergilemektedir. Bu özelliklerinden dolayı ökzetik yapıların kullanımı oldukça yaygındır. Enerji emme özelliği, bu yapıları zırhlı araç üretiminde ve çelik yelek imalatında kullanılabilir hale getirmiştir. Yüksek kopma dayanımı özelliği, bu yapıların dağcılık ekipmanlarının üretiminde kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Buna ilaveten ökzetik özellikteki köpükler filtre sistemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek ara yüzey dayanımı özelliği, bu yapıları duvar, köprü vb. inşaat sistemlerinde destek malzemesi olarak kullanılabilir hale getirmiştir. Ayrıca, ökzetik kafes yapıların çekme sırasında genişleyebilme özellikleri, bu yapıları kalp ve damar stentlerinde kullanılabilir kılmıştır.

2.4.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapılar

Literatürdeki kafes geometriler üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde, eklemeli imalatın kafes geometrilili yapıların üretimindeki üstünlüğü ön plana çıkmaktadır. Literatürde farklı eklemeli imalat yöntemleri ile çok sayıda kafes geometrinin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması mevcuttur. Kafes geometrilerin Poisson oranlarının içerdikleri dal konfigürasyonuna göre negatif veya pozitif olarak değişebilir olması, bu çalışmalarda mekanik özellik olarak Poisson oranlarının incelenmesine sebep olmuştur. Literatürdeki çalışmalara örnek olarak; FDM yöntemi ile PLA filamentinden 195°C baskı sıcaklığında, 30 mm/s üretim hızında çekme numuneleri üretilmiş ve 3 boyutta kafes yapıların kırılma davranışları SEM altında incelenmiştir (Xu v.d., 2019). Farklı gözenekli PLA yapılarının tek eksenli basma yüklemesi altında mekanik özelliklerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir (Ben Ali v.d., 2019). Ayrıca, elastik-kırılğan malzemelerden yapılmış kafes yapılarının

başlangıç bozunma yerini ve bozunma ilerlemesini tahmin etmek için çeşitli geometrilerde kafes yapılarının çekme-bozunma davranışı etkisi araştırılmıştır (Wu ve Yang, 2020). Buna ilaveten içerisinde kalsiyum fosfat, PLA ve HAP barındıran kompozit bir filamentten, FDM yöntemi ile 210°C baskı sıcaklığında, 2 saat sürede farklı kafes geometrilerde basma numuneleri üretilmiştir. Kemik implantı için tasarlanan 2,9 g/cm³ yoğunluklardaki bu kafes yapılardan altıgen kafes geometri, 7,55 MPa basma mukavemeti, 410 MPa basma modülü ve 0,35 Poisson oranı ile en yüksek değerleri sergilemiştir (Sahmani v.d., 2020). Silikon ve SiOC kompozit filamentinden FDM yöntemi ile doku mühendisliğinde kullanılmak üzere kafes yapılar üretilmiştir. 2,5 MPa basma dayanımı, 18 GPa elastik modül ve 2,25 GPa sertlik değerleri elde edilmiştir (He v.d., 2020). Doku mühendisliği için araştırılan bir başka kompozit filament çalışmasında FDM yönteminde kullanılmak üzere PLA içerisine bakır, gümüş ve bronz ayrı ayrı katkılandırılarak elde edilen filamentlerden kafes geometrili yapılar üretilmiştir.

Bakır katkılandırma işlemi sonucu elde edilen mekanik özellikler şöyledir:

Elastik modül: 1,65 GPa,

Çekme dayanımı: 15,22 MPa,

Tokluk: 168,4 J/m³,

Sertlik: 316,86 MPa.

Gümüş katkılandırma işlemi sonucu elde edilen mekanik özellikler şöyledir:

Elastik modül: 1,59 GPa,

Çekme dayanımı: 55,69 MPa,

Tokluk: 295,75 J/m³,

Sertlik: 471,69 MPa.

Bronz katkılandırma işlemi sonucu elde edilen mekanik özellikler şöyledir:

Elastik modül: 1,70 GPa,

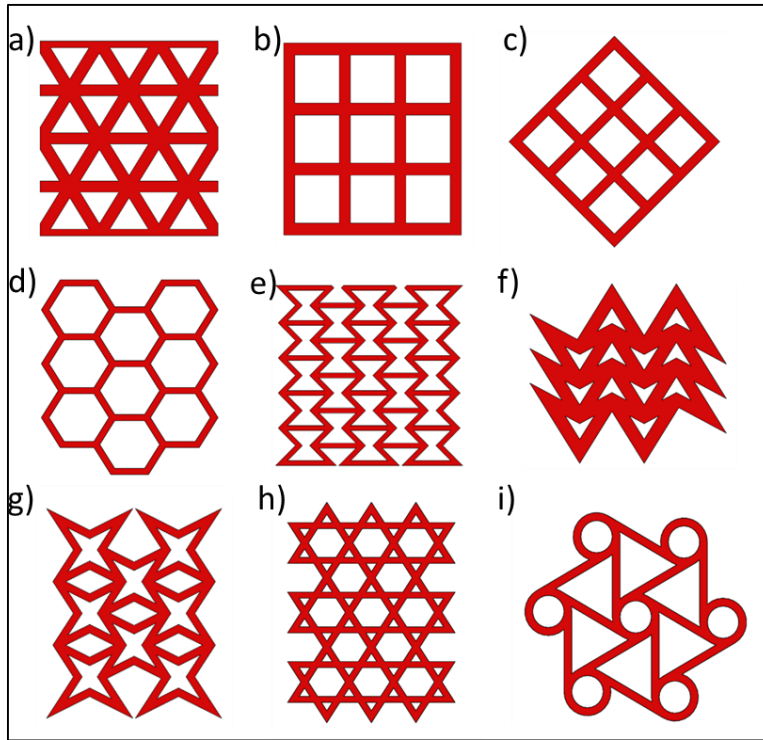
Çekme dayanımı: 13,62 MPa,

Tokluk: 40,97 J/m³,

Sertlik: 383,68 MPa.

Bu değerlerden de anlaşıldığı gibi, PLA içerisine gümüş ilavesi en uygun sonuçları vermektedir (Alam v.d., 2020). Dikkat çekici bir çalışma ise PLA polimerinden FDM yöntemi ile “fıstık” delikli kafes geometrilerin üretilmesidir. Bu çalışmada bu deliklerin sahip olduğu Poisson oranları araştırılmış ve -1,19 gibi yüksek bir ökzetiklik değeri elde edilmiştir (Wang v.d., 2020b).

Literatürde araştırılan başlıca kafes geometriler aşağıda listelenmiştir. Bu geometrilere ait kafes yapılar Şekil 2.3’te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Kafes geometrili yapılar: a) Üçgen geometri; b) Kare geometri; c) Elmas geometri; d) Altıgen geometri; e) Re-entrant geometri; f) Ok başı geometri; g) Yıldız geometri; h) Kagome geometri; i) Kiral geometri.

Üçgen geometri

Üçgen geometri, topoloji optimizasyonu çalışmaları çerçevesinde, nihai ürünü aynı yük kapasitesinde daha hafif olarak üretilebildiği, en sık kullanılan kafes geometrilerden biridir. Bu geometri, sahip olduğu dış bükey dal yapısı nedeniyle pozitif (+) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Kare geometri

Kare geometri ise topoloji optimizasyonu çalışmaları çerçevesinde, kütle eksilterek aynı yükü daha hafif bir şekilde karşılayabilen ürünlerin üretimi çalışmalarında, en sık kullanılan kafes geometrilerden bir diğeridir. Bu geometri, sahip olduğu dal yapısı nedeniyle yaklaşık olarak sıfır (0) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Elmas geometri

Elmas geometri, kafes geometrili yapıların kullanımı, mekanik özellikleri ve karakterizasyonları çalışmaları çerçevesinde nadir tercih edilen geometrilerden biridir. Bu geometri, sahip olduğu dış bükey dal yapısı nedeniyle pozitif (+) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Altıgen geometri

Altıgen geometri, kafes geometrili yapıların kullanımı, mekanik özellikleri ve karakterizasyonları çalışmaları çerçevesinde en sık tercih edilen geometrilerden biridir. Bu geometri, sahip olduğu dış bükey dal yapısı nedeniyle pozitif (+) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Re-entrant geometri

Re-entrant geometri, ökzetik yapıların kullanımı, mekanik özellikleri ve karakterizasyonları çalışmaları çerçevesinde en sık tercih edilen geometrilerden biridir. Bu geometri, iç bükey dal yapısı barındırması nedeniyle negatif (-) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Ok başı geometri

Ok başı veya bilinen diğer adıyla çift V geometri, ökzetik yapıların kullanımı, mekanik özellikleri ve karakterizasyonları çalışmaları çerçevesinde, kullanımına nadiren rastlanan geometrilerden biridir. Bu geometri, iç bükey dal yapısı barındırması nedeniyle negatif (-) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Yıldız geometri

Yıldız geometri, kafes geometrili yapılar arasında nadiren kullanılan bir diğer geometrik şekildir. Bu geometri, sahip olduğu dış bükey dal yapısı nedeniyle negatif (-) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Kagome Geometri

Kagome geometri, kafes geometriler arasında rastlanılan en nadir yapıdır. Bu geometri, sahip olduğu dış bükey dal yapısı nedeniyle pozitif (+) Poisson oranı özelliği sergilemektedir.

Kiral Geometri

Sıradışı bir yapıya sahip olan kiral geometri, kafes geometriler içerisinde, aynı yapı altında birden çok geometri barındıran bir şekle sahiptir. Bu geometrilerden birisi daire olmak üzere diğeri yukarıda bahsedilen herhangi bir geometri olabilir. Bu geometri, bünyesinde barındırdığı bu dal yapısı dolayısıyla yüksek basma özellikleri sergiler. Poisson oranı ise şekilden şekile değişkenlik göstermektedir.

Bu geometrilere ait çalışmalar ve belgelenen Poisson oranları Çizelge 2.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.5. Kafes geometriler ve sahip oldukları Poisson oranları

Şekil	Malzeme	Yöntem	Poisson Oranı	Referans
Üçgen	Fotopolimer reçine	SLA	0,2	Chen v.d., 2020
	L5D11	SLA	0,25	Mahbod ve Asgari, 2019
Kare	PLA	FDM	0	Carneiro v.d., 2019
	Naylon	SLS	0,25	Duan v.d., 2020
	Kauçuk	SLA	-0,6	Wang, 2018
	Polijet malzemesi	Polijet	-2	Choi v.d., 2019
	PE	FDM	0,05	Yang ve Ma, 2018
Elmas	Naylon	SLS	1	Yang v.d., 2019b
Altıgen	Aluminyum	SLM	1	Hou v.d., 2016
	PLA	FDM	0,5	Carneiro v.d., 2019
	Polijet malzemesi	Polijet	1	Simpson ve Kazancı, 2020
Re-entrant	PLA	FDM	-0,89	Quan v.d., 2020
	PLA	FDM	-0,5	Carneiro v.d., 2019
	Polijet malzemesi	Polijet	-0,23	Carneiro ve Puga, 2018
	Polijet malzemesi	Polijet	-0,6	Li v.d., 2018
	Polijet malzemesi	Polijet	-0,4	Wang v.d., 2015a
	DM9760	Polijet	-0,25	Jiang v.d., 2019
	Epoksi/Cam	FDM	-0,24	Assidi ve Ganghoffer, 2012
	AlSi10Mg	SLM	0,44	Xiao v.d., 2019
	AlSi10Mg	SLM	-0,15	Dong v.d., 2019

Çizelge 2.5. (devam) Kafes geometriler ve sahip oldukları Poisson oranları

Şekil	Malzeme	Yöntem	Poisson Oranı	Referans
Re-entrant	Aluminyum	SLM	-1	Fu v.d., 2017
	Aluminyum	SLM	-0,5	Zhang v.d., 2018
	Aluminyum/Epoksi	SLA/Döküm	-1	Xue v.d., 2019
	Aluminyum/Epoksi	SLA/Tel kesme	-0,2	Tan v.d., 2019
	Aluminyum/Reçine	SLA/Döküm	-1,2	Xue v.d., 2018
	Ti6Al4V	SLM	-0,89	Yao v.d., 2020
	Ti6Al4V	SLM	-0,18	Kolken v.d., 2020
	Paslanmaz Çelik	SLM	-0,8	Wang v.d., 2017b
	Paslanmaz Çelik/Nikel	SLM	-2,4	Cong v.d., 2019
Kiral	ABS	FDM	-0,5	Hu v.d., 2019a
	ABS	FDM	-0,25	Hu v.d., 2019b
	ABS	FDM		Hu v.d., 2019c
	ABS	FDM	0,26	Auricchio v.d., 2019
	PLA	FDM	-0,5	Hu v.d., 2020
	TPU	FDM	-0,55	Hamzehei v.d., 2020
	Reçine	SLA	-0,94	Fu v.d., 2018
	PLA	FDM	-0,3	Zhao v.d., 2021
	AlSi10Mg	SLS/SLM	-0,93	Ma v.d., 2018
	Bakır	EBM	-0,2	Novak v.d., 2020
	Paslanmaz Çelik	Lazer kesme	-1,04	Wu v.d., 2018
Kagome	Ti6Al4V	SLM	0,5	Zhang v.d., 2020b
Eliptik	Silikon	FDM	-0,27	Francesconi v.d., 2019
Yıldız	ABS	FDM	-0,56	Ai ve Gao, 2018
	Akrilik	SLA	-0,53	Li v.d., 2019
	Aluminyum	SLM	-0,38	Wei v.d., 2020b
Ok başı	Aluminyum/Reçine	SLA/Döküm	-1,73	Xue ve Han, 2019
	Paslanmaz Çelik	SLM	-1,75	Yang v.d., 2019c
	Paslanmaz Çelik	Lazer kaynak	-1,25	Gao v.d., 2018
	Fotopolimer reçine	SLA	-0,2	Yang ve Ma, 2020
	ABS	SLA	-1	Gao v.d., 2020c

3. DENEYSEL YÖNTEM

Bu başlık altında gerçekleştirilmesi planlanan deneylerin (PLA/h-BN kompozitlerinin eldesi, filament üretimi ve 3d yazıcı içerisinde kullanımı, re-entrant şekilli kafes geometrili yapıların çekme ve basma numunelerinin üretimi) aşamaları anlatılmıştır. Ayrıca, uygulanan mekanik testler (çekme, basma, mikrosertlik) ve mikroyapı analizlerinin (yoğunluk analizi, DSC, TGA, XRD, FTIR) koşullandırmaları ve yöntemleri belirtilmiştir.

3.1. Bor Nitrür İçeren PLA Filament Üretimi ve FDM Yönteminde Kullanımı

Bu tezde, PLA polimer içerisine, kütlece %1 oranında h-BN katkılanmıştır. Bu katkılama işlemi, bir cam reaktör içerisinde (38°C – 350 rpm) gerçekleştirilmiştir. Çözücü olarak her bir karışım için 2,5 l. tetrahidrofuran (THF) kullanılmıştır. Öncelikle granül formdaki PLA, THF çözücüsü içerisine ilave edilmiştir. 24 saat boyunca karıştırılan PLA granüller tam çözündükten sonra h-BN ilavesi kademe kademe gerçekleştirilmiştir. 24 saat boyunca karıştırılan PLA/h-BN kompozitleri, metal/cam bir tepsi üzerine ince tabakalar halinde dökülmüştür. Tepsi üzerindeki kompozit numuneler küçük parçalara ayrılarak 48 saat bir vakumlu fırında 40°C’de kurutulmuştur. Çözücü sistemden tam olarak uzaklaştırıldıktan sonra, kuru PLA/h-BN kompozitleri tek/çift vidalı bir filament ekstrüder (Flax Arya, Türkiye) kullanılarak (200°C, 1.75 mm) üretilmiştir. Daha sonra üretilen filamentlerden mikrosertlik numunesi, 3d yazıcıda kullanılarak %100 iç doluluk oranlarında üretilmiştir. Üretim aşamaları Resim 3.1’de gösterilmektedir.



Resim 3.1. PLA/h-BN üretim aşamaları: a) Homojen karıştırılıp kurutulan formu; b) Ekstrüder için küçültülmüş form; c) Granül form; d) PLA/h-BN filament; e) 3d yazıcı formu.

Mekanik testler ve mikroyapı analizleri olarak sırasıyla, mikrosertlik deneyleri, yoğunluk, DSC, TGA, XRD, FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numunelere mikrosertlik deneyleri uygulanmış, yoğunluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik (Shimadzu HVM mikrosertlik test cihazı) deneyinde ise 20 saniye boyunca 100 g (0.981 N) yük, numunelerin üzerine uygulanmıştır. Uygulanan yük sonucu yüzey üzerinde oluşturulan oyuk boyutları ölçülüp Eşitlik 3.1’de yazılarak numunelerin mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. Eş. 3.1’de F uygulanan yükü, d_1 ve d_2 oyuk boyutlarını temsil etmektedir.

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} \quad (3.1)$$

Yoğunluk deneyi olarak “Arşimet yoğunluk deneyi modeli” esas alınmıştır. Buna göre, numunenin havadaki ağırlığı ve su içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür. Ölçülen değerler Eş. 3.2’de yerlerine yazılarak numunenin yoğunluğu belirlenmiştir. Bu eşitlikte ρ_s , suyun yoğunluğu olup, 0.997 g/cm^3 olarak esas alınmaktadır.

$$\rho_n = \frac{W_h \times \rho_s}{W_h - W_s} \quad (3.2)$$

TGA (Perkin elmer pyris 1 termogravimetrik analiz cihazı) analizleri, azot ortamında, 40-600°C sıcaklık aralığında 10°C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz ile PLA'nın sıcaklık artışına göre kütle kaybı belirlenmiştir. DSC (Perkin elmer diamond diferansiyel taramalı kalorimetre) analizi de TGA analizi ile benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, azot ortamında, 40-600°C sıcaklık aralığında 10°C/dk ısıtma hızında, PLA, DSC analizine tabi tutularak PLA'nın camsı geçiş sıcaklığının tayini gerçekleştirilmiştir. XRD (Rigaku ultima-iv x-ışını kırınım cihazı) analizi ise ince filmlerde kırınım deseni çekimi olarak, 5-75° tarama aralığında, 0,1°/dk tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Bu analize göre, PLA polimerinin içerisine x ışınları göndererek polimerin faz analizi araştırılmıştır. FTIR (IFS 66/S) analizi ile 400-4000 cm⁻¹ dalga sayısı arasında polimer içerisine kızılötesi ışınlar gönderilerek PLA polimerinin bağ yapıları karakterize edilmiştir.

3.2. Re-entrant Şekilli Ökzetik Yapıların Üretimi, Mekanik Testleri ve Karakterizasyonları

Bu tezde, temin edilen PLA filamentleri (Alya3D, Türkiye), FDM yöntemi ile çalışan bir 3d yazıcıda (3D4E, Türkiye) kullanılarak farklı parametrelerde çekme ve basma deney numuneleri üretilmiştir. Bu tezde negatif Poisson oranına sahip şekiller, re-entrant ve eğri geometriler olarak belirlenmiştir. Bu kafes geometriler kullanılarak 3d yazıcıda çekme ve basma numuneleri ASTM D638 ve ASTM D695 standartlarına uygun olarak üretilmiştir.

Üretim esnasında re-entrant geometri için en (mm), boy (mm) ve açı (°); eğri geometri için kalınlık (mm) ve yarıçap (mm) değişkenleri belirlenmiştir. Bu değişkenlerin her birinin 3 farklı parametrede denenmesi ve her bir numunenin istatistiki açıdan doğru kabul edilebilmesi için 3 adet üretilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı çok sayıda deney numunesi üretimi ve çok sayıda uygulanması gereken test ve deney olmaktadır. Üretilen numune ve yapılan deney/test/analiz sayısını en uygun miktara indirmek için deney tasarımı yöntemlerine başvurulmalıdır. Deney tasarımı yapılması ve yapılmaması halinde oluşan deney numuneleri sayısı Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney tasarımından önce ve deney tasarımından sonraki üretilmesi planlanan numune sayıları

Değişkenler		Re-Entrant Şekil	Eğri Şekil	Toplam
		H-L- θ	R-D	
Deney tasarımı olmadığı halde	Çekme Numunesi	27 x 3 = 81	9 x 3 = 27	108
	Basma Numunesi	27 x 3 = 81	9 x 3 = 27	108
	Toplam	162	54	216
Deney tasarımı halinde	Çekme Numunesi	15	11	26
	Basma Numunesi	15	11	26
	Toplam	30	22	52

Deney tasarımı metotlarından re-entrant geometri için “Box Behnken Deney Tasarımı Metodu” ve eğri geometri için “Tüm Faktöriyel Deney Tasarımı Metodu” kullanılarak uygun üretim ve deney sayısı belirlenmiştir. Deney tasarımlarına göre üretilen çekme deney numuneleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Buna göre çekme numuneleri için 15 re-entrant ve 11 eğri geometri deney numunelerinin kodları atanmıştır. Bu kodlara göre Re; re-entrant kafes geometriyi, E; eğri kafes geometriyi, H; kafes yapının birim hücre düşey mesafesini, L; kafes yapının birim hücre yatay mesafesini, A; 2 dal arası açığı, R; eğri yüzey yarıçapını ve D; dal kalınlığını temsil etmektedir.

Çizelge 3.2. Deney tasarımına göre üretilen çekme numunesi sayısı

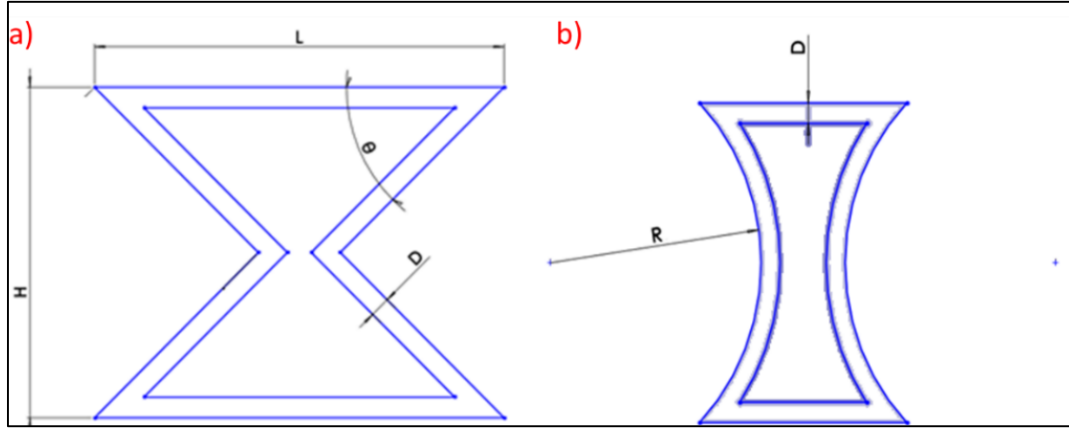
Box Behnken Deney Tasarımı				Tüm Faktöriyel Deney Tasarımı		
Numuneler	Re-entrant Kafes Yapı Değişkenleri			Numuneler	Eğri Geometri Kafes Yapı Değişkenleri	
	H (mm)	L (mm)	Θ (°)		R (mm)	D (mm)
Re-H40L35A825	4	6	70	E-R150D15	5	2,25
Re-H40L45A825	4	10	70	E-R150D12	5	1,5
Re-H60L35A825	6	6	70	E-R150D10	5	0,75
Re-H60L45A825	6	10	70	E-R125D15	3,75	2,25
Re-H40L40A800	4	7,5	60	E-R125D12	3,75	1,5
Re-H40L40A850	4	7,5	80	E-R125D10	3,75	0,75
Re-H60L40A800	6	7,5	60	E-R100D15	2,5	2,25
Re-H60L40A850	6	7,5	80	E-R100D12	2,5	1,5
Re-H50L35A800	5	6	60	E-R100D10-1	2,5	0,75
Re-H50L35A850	5	6	80	E-R100D10-2	2,5	0,75
Re-H50L45A800	5	10	60	E-R100D10-3	2,5	0,75
Re-H50L45A850	5	10	80			
Re-H50L40A825-1	5	7,5	70			
Re-H50L40A825-2	5	7,5	70			
Re-H50L40A825-3	5	7,5	70			

Deney tasarımına göre üretilmiş basma deney numuneleri ise Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Deney tasarımına göre üretilmesi gereken basma numunesi sayısı

Box Behnken Deney Tasarımı				Tüm Faktöriyel Deney Tasarımı		
Numuneler	Re-entrant Kafes Yapı Değişkenleri			Numuneler	Eğri Geometri Kafes Yapı Değişkenleri	
	H (mm)	L (mm)	Θ (°)		R (mm)	D (mm)
Re-H40L35A60	4	3,5	60	E-R450D15	4,5	1,5
Re-H40L65A60	4	6,5	60	E-R450D12	4,5	1,25
Re-H55L35A60	5,5	3,5	60	E-R450D10	4,5	1
Re-H55L65A60	5,5	6,5	60	E-R325D15	3,25	1,5
Re-H40L50A50	4	5	50	E-R325D12	3,25	1,25
Re-H40L50A70	4	5	70	E-R325D10	3,25	1
Re-H55L50A50	5,5	5	50	E-R200D15	2	1,5
Re-H55L50A70	5,5	5	70	E-R200D12	2	1,25
Re-H45L35A50	4,5	3,5	50	E-R200D10-1	2	1
Re-H45L35A70	4,5	3,5	70	E-R200D10-2	2	1
Re-H45L65A50	4,5	6,5	50	E-R200D10-3	2	1
Re-H45L65A70	4,5	6,5	70			
Re-H45L50A60-1	4,5	5	60			
Re-H45L50A60-2	4,5	5	60			
Re-H45L50A60-3	4,5	5	60			

Bir çekme numunesi üzerindeki gözenek geometrilerin her birine birim hücre adı verilir. Yukarıda anlatılan deney tasarımları, birim hücre boyutlarındaki değişkenler, parametre olarak esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten, kafes geometrili yapıların her bir kenarına dal adı verilir. Çekme ve basma numuneleri içerisinde bulunan re-entrant ve eğri geometriye ait birim hücreler, Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Ökzetik yapılı kafes geometrilerin birim hücreleri: a) Re-entrant şekil; b) Eğri şekil.

Şekil 3.1.a) üzerinde, re-entrant kafes geometrili birim hücrenin en, boy, kalınlık ve açı uzunlukları gösterilmiştir. Buna göre, H (mm) birim hücrenin boyunun uzunluğu, L (mm) birim hücrenin en uzunluğu, D (mm) dal kalınlığı ve θ , 2 dal arasındaki açıyı temsil etmektedir. Ayrıca, Şekil 3.1.b) üzerinde, eğri kafes geometrili birim hücrenin yarıçap ve kalınlık mesafeleri gösterilmiştir. Buna göre, R (mm) eğri kenarın sahip olduğu çemberin yarıçapı ve D (mm) dal kalınlığıdır.

Üretilen numunelerden mekanik özelliği en yüksek olan numunenin belirlenebilmesi için tüm numunelere mekanik testler (çekme/basma) uygulanmıştır. Çekme ve basma deneyi olarak Instron 5582 çekme/basma cihazı, 1 mm/dk hızda çalıştırılarak çekme ve basma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri TESA-rugosurf 20 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen çekme ve basma deneylerinin deney sonuçları; çekme dayanımı ve poisson oranı bakımından SPSS istatistik programı yardımıyla analiz edilmiş, en, boy, iç açı veya yarıçap ve dal kalınlığı parametrelerinin hangilerinin bu deney sonuçlarına etki ettiği araştırılmıştır.

3.2.1. Ökzetik yapıların mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar analizi ile doğrulanması

Üretilen deney numunelerinin test ve analiz sonuçlarının doğruluğunun belirlenebilmesi için sonlu elemanlar analizi yöntemine başvurulmuştur. Bu yöntem adı altında ANSYS Workbench 19.2/Mechanical APDL simülasyon programı kullanılarak SOLIDWORKS

programında tasarlanan ökzetik yapılı numuneler üzerinde çekme ve basma simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Bu simülasyona göre çekme ve basma numuneleri, Steinberg-Guinan malzeme modeli kullanılarak 15 mm deplasman altında çekme ve basma deneylerine tabi tutulmuştur. Program kütüphanesinden seçilen PLA'nın elastik modülü 524 MPa, maksimum çekme dayanımı 361 MPa olarak belirlenmiştir. Buna ilaveten kare şeklinde mesh geometrisi tercih edilmiş ve 2 node arası uzaklık 1 mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar 5 nolu başlık altında gösterilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Bor Nitrür İçeren PLA Filament Çekilmesi ve Üç Boyutlu Yazıcıda Kullanımı, Deney ve Analiz Sonuçları

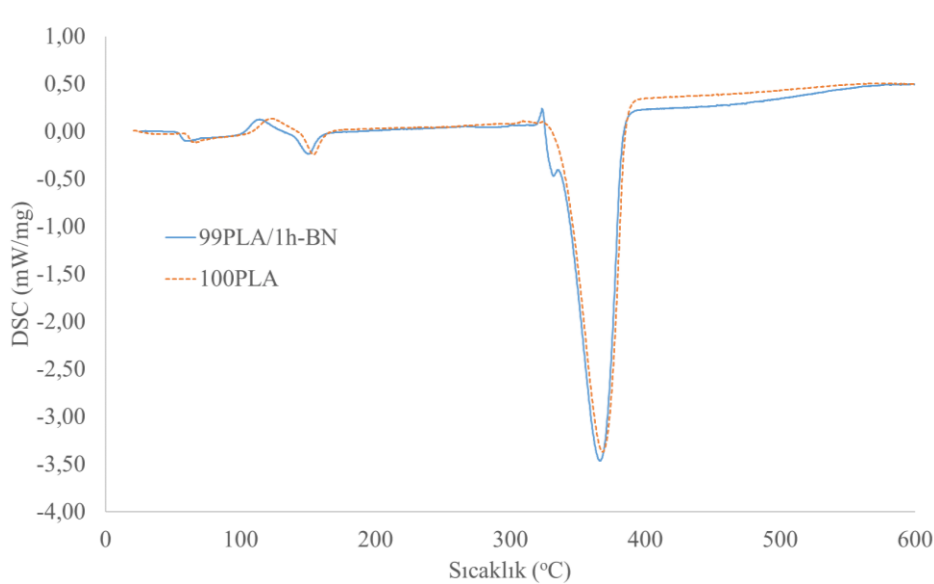
Elde edilen sonuçlara göre 100PLA ve 99PLA/1h-BN numunelerinin yoğunlukları ve mikrosertlik değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi kütlece %1 oranında h-BN ilavesi kompozit numune yoğunluğunu %3 oranında arttırmıştır. Bu artış katkılanırılan h-BN’nin yoğunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Buna ilaveten kütlece %1 oranında h-BN ilavesi kompozit numunenin mikrosertlik değerini %191 oranında arttırmıştır. Bu artış katkılanırılan h-BN tozunun, kompozit bünyesine kendi sertlik özelliğini kazandırmıştır. Deney sonuçlarında, kullanılan polimer içerisine düşük oranlarda (%1) h-BN katkılanırma işlemi, polimerin sertlik değerinde artış göstermiştir. Literatür incelendiğinde, PLA içerisine %1 oranında mikro h-BN ilavesi sonucu PLA’nın mikrosertlik değeri 78 HS, %2 h-BN ilavesi sonucu 79 HS olarak ölçülmüştür (Vishnu Chandar v.d., 2020). PLA içerisine h-BN ilavesi ve mikrosertlik ölçümlerinin gerçekleştirilmesine ilişkin bir makalede saf PLA’nın mikrosertlik değeri 80 HS, %15 h-BN ilavesi sonucu 77 HS olarak ölçülmüştür. Buna göre h-BN ilavesi yüksek miktarda gerçekleştirildiğinde, mikrosertlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (Ghaffari v.d., 2015).

Çizelge 4.1. h-BN katkılı kompozitlerin yoğunluk ve mikrosertlik değerleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Mikrosertlik (HV)
100PLA	1,25 ± 0,01	89,83 ± 3,89
99PLA/1h-BN	1,29 ± 0,01	260,33 ± 10,69

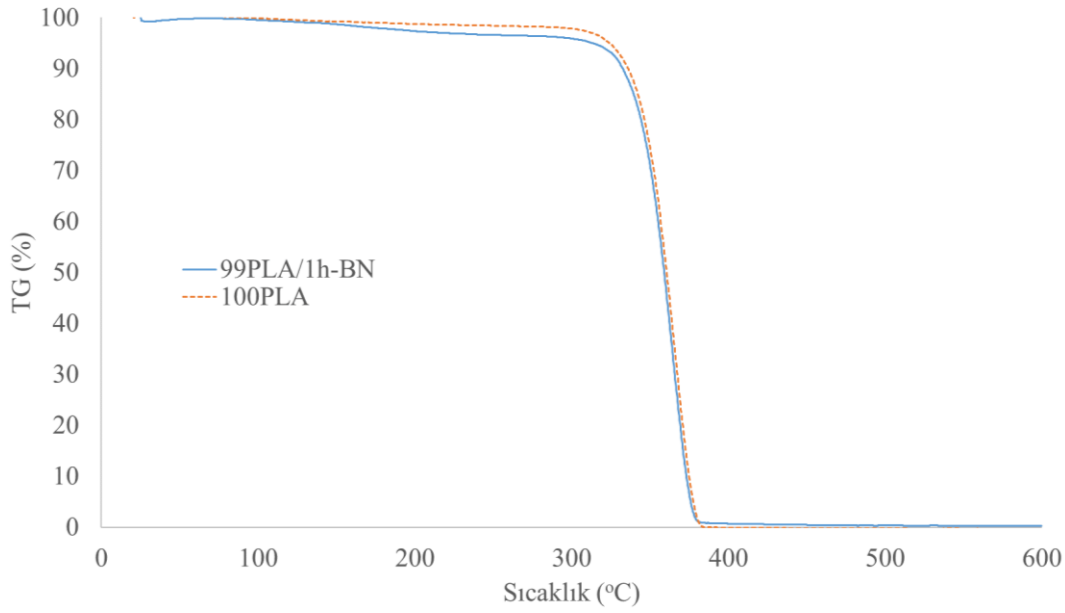
h-BN kompozit numunelerin DSC analiz sonucu Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1’e göre, 100PLA’nın camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 60°C iken, 99PLA/1h-BN numunesinin T_g değeri 51,8°C’dir. Buna ilaveten 100PLA’nın 126,5°C sıcaklıkta (T_c) kristalleşmeye başladığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.1’e göre 100PLA’nın soğuk kristalleşme sıcaklığına sahip olması, bu numunenin yarı kristal yapıda olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 100PLA’nın 154,8°C’de (T_m) erimeye başladığı belirlenmiştir. En yüksek erime hızı maksimum degradasyon değeri olan 368,5°C’de gözlemlenmektedir. Bu değerler 99PLA/1h-BN için 148,6°C; 330,9°C ve 366,4°C’dir. h-BN katkılı kompozit numunenin erime hızının maksimum değere ulaştığı sıcaklık 366,4°C olarak bulunmuştur. Bu sonuç seramik

ilavesinin polimerlerin ısı özelliklerini etkilediğini, %1 h-BN ilavesinin PLA'nın T_g , T_c ve T_m değerlerini düşürdüğünü ifade etmektedir. PLA ve ABS'nin 3d yazıcılara optimizasyonunu araştıran bir çalışmada PLA'nın T_g değeri 62,1°C, T_m değeri ise 151,77°C olarak bulunmuştur (Abeykoon v.d., 2020). Bu değerlerin kullanılan PLA filamentlerin farklı olması dikkate alındığında bu çalışmadaki değerler ile uyum sağladığı sonucuna varılabilir. PLA ve farklı Silisyum kompozitlerinin ısı ve mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada ise, PLA'nın T_g değeri 56,1°C, T_c değeri 110,1°C ve T_m değeri de 151,6°C olarak bulunmuştur (Kodal v.d., 2018). Bu çalışmadaki T_g , T_c ve T_m değerlerindeki farklılıklar, kullanılan PLA'nın üretim ve kullanım koşulları nedeniyledir. Bu tezde kullanılan PLA ile yüksek ölçüde bir farklılık tespit edilmemiştir. Eklemeli imalat yönteminde kullanılan karbon nanotüp/PLA kompozitlerinin mikroyapılarını inceleyen bir çalışmada ise PLA'nın en yüksek erime hızı 374°C olarak ölçülmüştür (Zhou v.d., 2021). Paketleme alanında kullanılmak üzere h-BN takviyeli PLA çalışmasında, T_g değeri 62,4°C ve T_c değeri 105,8°C iken %1 h-BN ilavesi bu değeri değiştirmemiştir (Bindhu v.d., 2018). PLA/h-BN kompozitlerinin elektronik paketlemede uygulamasının incelendiği çalışmalarda, h-BN katkısının PLA'nın T_g değerini değiştirmedeği (61,9°C) sonucuna ulaşılmıştır (Ghaffari v.d., 2015; Kumar v.d., 2017). Bu sonuçlar bu tez çalışması ile uygunluk göstermektedir.



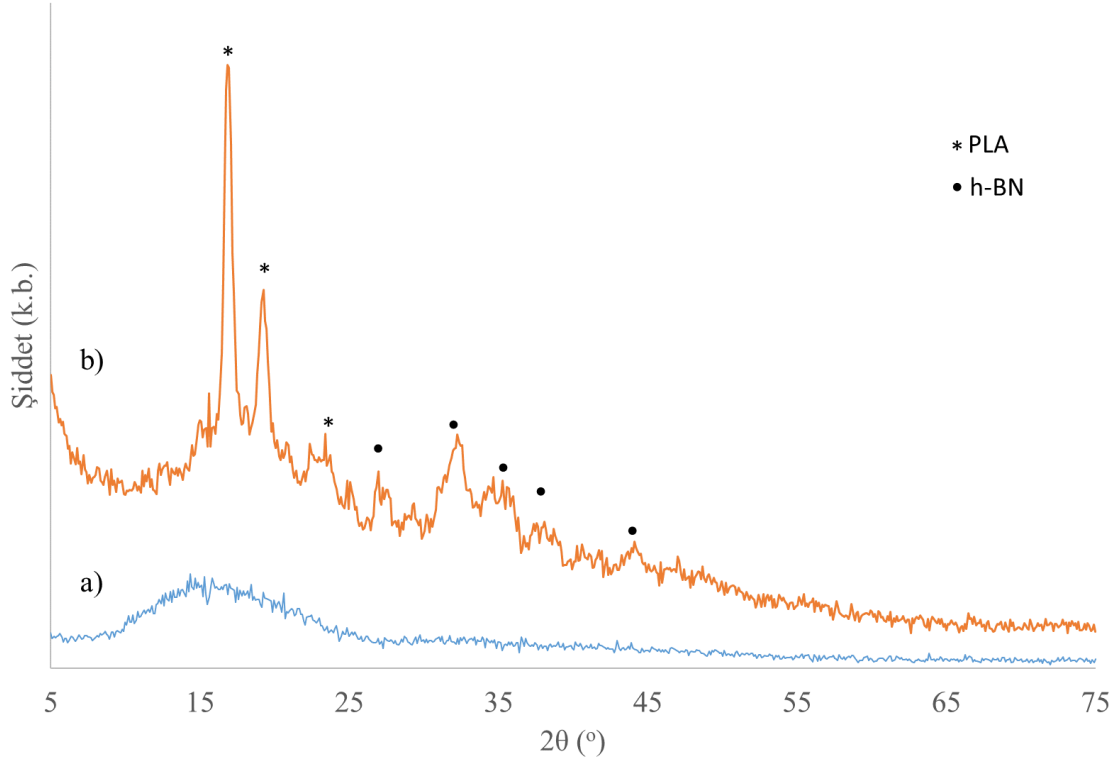
Şekil 4.1. h-BN katkılı numunelerin DSC analizi

h-BN katkılı kompozit numunelerin TGA analizi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. TGA analizi DSC analizi ile birlikte yorumlanabilir. Buna göre Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 birlikte ele alındığında, turuncu kesikli çizgiler ile gösterilen 100PLA erimeye başlamadan önce yataya yakın bir eğri gösterirken, mavi çizgi ile gösterilen 99PLA/1h-BN’nin azalım göstermesi, h-BN katkılı numunelerin içerisinde nem olduğunu, 100PLA numunesinin ise ısı kararlı ve kuru olduğunu göstermektedir. 100PLA’nın 154,8°C sıcaklıkta (T_m) erimeye başladığı belirlenmiştir. En yüksek erime hızı maksimum degradasyon değeri olan 368,5°C’de gözlemlenmektedir. Bu değerler 99PLA/1h-BN için 148,6°C; 330,9 ve 366,4°C’dir. h-BN katkılı kompozit numunenin erime hızının maksimum değere ulaştığı sıcaklık 366,4°C olarak bulunmuştur. Bu sonuç h-BN ilavesinin PLA’nın ısı özelliklerinde bir değişiklik göstermediğini göstermiştir. Literatürde, PLA’nın ısı özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, erime hızının maksimum değere ulaştığı sıcaklık 349°C olarak ölçülmüştür (Hayoune v.d., 2020). PLA’nın TGA analizinin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada ise bu değer 382,4°C olarak ölçülmüştür (Xiang v.d., 2020). Bir diğer araştırmada bu değer 360°C olarak bulunmuştur (Zheng v.d., 2020). Paketleme alanında kullanılmak üzere h-BN takviyeli PLA çalışmasında, erime hızının maksimum değere ulaştığı sıcaklık 330°C iken %1 h-BN ilavesi bu değeri 15°C düşürmüştür (Bindhu v.d., 2018). Literatür ile bu tezde analizi gerçekleştirilen PLA ve h-BN katkılı kompozit numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların uygun olduğu görülmektedir.



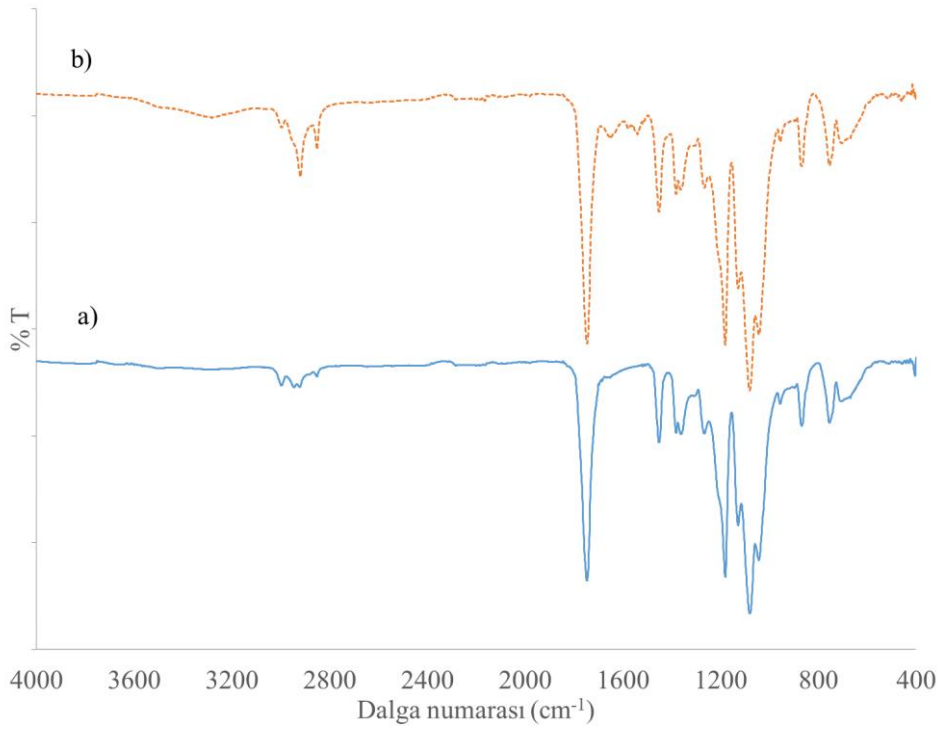
Şekil 4.2. h-BN katkılı numunelerin TGA analizi

h-BN katkılı kompozit numunelerin XRD analizi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.3, PLA polimerinin (100PLA) amorf yapıda olduğuna işaret etmektedir. 10-30° aralığındaki yaygın pik dağılımı bu amorfliği simgelemektedir. Ek olarak PLA/h-BN kompoziti (99PLA/1h-BN) PLA amorf piklerinin (16,8; 19; 24 derecelerde) yanında, 26,67 (JCPDS kart no #34-0421); 32,5 (JCPDS kart no #73-2095); 41,6 (JCPDS kart no #85-1068); 43,8 (JCPDS kart no #85-1068) derecelerde h-BN pikleri vermektedir. PLA amorf piklerinin görünme sebebi, bu kompozitin en az 2 günlük biyobozunma süreci geçirmiş olmasıdır (Luo v.d. 2019). Bu sonuç h-BN ilavesinin PLA'nın amorf yapısını daha kristal bir yapıya dönüştürdüğünü göstermektedir. Literatür incelendiğinde, h-BN nanolevha çalışılan bir çalışmadaki h-BN pikleri (Acharya v.d., 2021), h-BN titanyum kompozitleri çalışılan diğer bir çalışmadaki h-BN pikleri (Büyük v.d., 2020) ve h-BN kristal tozlarının incelendiği bir çalışmadaki h-BN pikleri (Maharjan v.d., 2021), Şekil 4.3'teki h-BN pikleri ile örtüşmektedir. Buna ilaveten, PLA filamentinin 3d yazıcılarda kullanımı ve soğutucu fanın etkisi incelenen bir çalışmadaki PLA amorf pikleri (Lee ve Liu, 2019), Şekil 4.3'teki PLA amorf pikleri ile örtüşmektedir.



Şekil 4.3. h-BN katkılı numunelerin XRD analizi: a) 100PLA numunesi; b) 99PLA/1h-BN numunesi.

h-BN katkılı kompozit numunelerin FTIR analizi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'e göre, PLA/h-BN kompozitlerinin bağ yapıları belirlenmiştir. Buna göre, bileşiklerin yaptığı C-H ($2996,05 \text{ cm}^{-1}$), C-H₂ ($2946,01 \text{ cm}^{-1}$), C-H₃ (1456 cm^{-1}), C-C ($956,22 \text{ cm}^{-1}$), C-O (1087 cm^{-1}), C=O ($1745,91 \text{ cm}^{-1}$), C-O-C (1187 cm^{-1}) bağlar belirlenmiştir. %1 h-BN ilavesi, FTIR grafiği üzerinde anlamlı bir değişikliğe yol açmamıştır. Dolayısıyla Şekil 4.4' teki 100PLA ve 99PLA/1h-BN grafikleri benzer değerler göstermektedir. Literatür araştırmaları incelendiğinde, PLA ince filmlerin araştırıldığı bir çalışmadaki FTIR sonuçları (Pai v.d., 2019; Siriprom v.d., 2018) ve PLA içerisine ilaç sanayisinde kullanılmak üzere farklı yüzdelerde TiO₂ katkılandıran bir çalışmadaki FTIR sonuçları, Şekil 4.4 ile örtüşmektedir. Ayrıca, Ti yüzdesi %1 oranında katkılandırıldığı zaman FTIR sonuçlarında belirgin bir değişikliğe rastlanmamıştır (Salahuddin v.d., 2020).



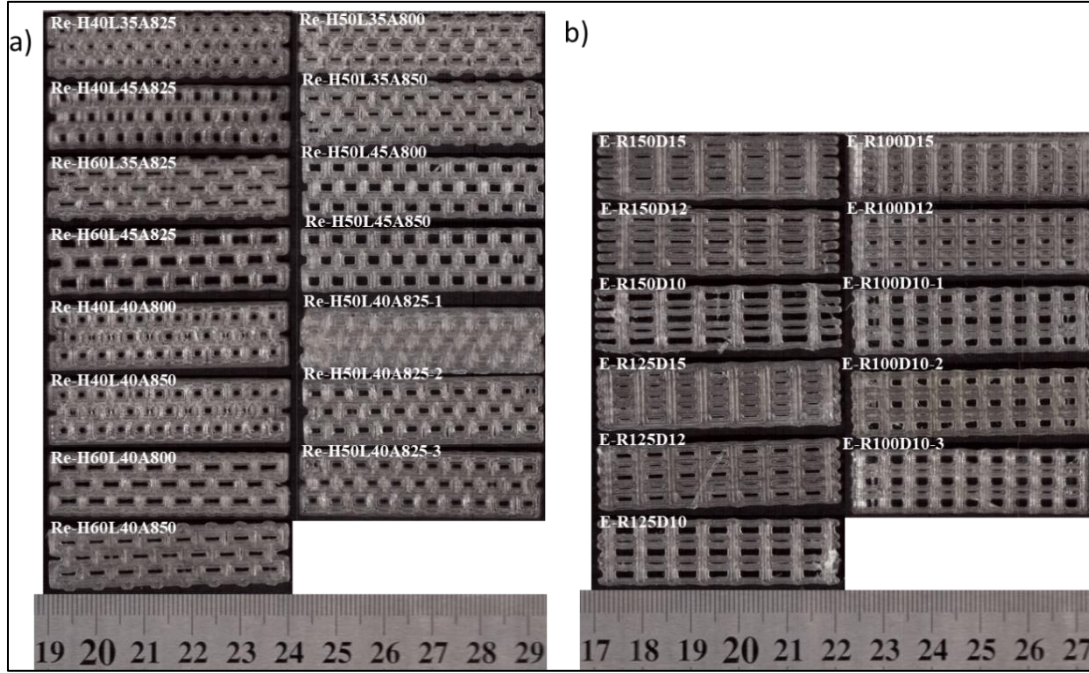
Şekil 4.4. h-BN katkılı numunelerin FTIR analizi: a) 100PLA numunesi; b) 99PLA/1h-BN numunesi.

4.2. Kafes Yapıların Üç Boyutlu Yazıcılarda Üretimi

Bu tezde negatif Poisson oranına sahip şekiller re-entrant ve eğri geometriler olarak belirlenmiştir. Bu kafes geometriler kullanılarak 3d yazıcıda çekme ve basma numuneleri üretilmiştir.

4.2.1. Negatif Poisson oranına sahip kafes yapıların FDM ile üretimi ve analizleri

Kafes yapılı geometrilerin box-behnken tasarımına göre FDM ile üretimi ve bu numunelerin kodları Resim 4.1’de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Üretilen ökzetik yapıli kafes geometriler: a) Re-entrant şekil; b) Eğri şekil.

Buna göre tüm çekme numunelerinin iç bükey (re-entrant ve eğri) gözenek geometrileri yüzey pürüzlülük ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için ayrıca, üretilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’ de gösterilmektedir.

Üretim yönü ile aynı doğrultuda yapılan pürüzlülük ölçüm sonuçları filament yüzeylerinin pürüzsüze yakın olduğunu göstermektedir. Ölçüm doğrultu açısı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinde artış gözlemlenmektedir. Bu sonuç numune üretimi sırasında art arda biriktirilen filamentlerin geniş çapta olmasından dolayı yüzeylerde pürüz oluştuğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2. Üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Ölçüm doğrultusu (°)	Re-entrant şekil yüzey pürüzlülüğü (μm)	Eğri şekil yüzey pürüzlülüğü (μm)
0	0,8205 ± 0,013	0,582 ± 0,11
45	5,621 ± 0,856	5,547 ± 1,534
90	22,331 ± 2,068	20,023 ± 7,413

Literatür içerisindeki re-entrant şekilli çekme numunelerinin poisson oranları incelendiğinde, düşey uzunluğu 288 mm, yatay uzunluğu 380 mm olan 25 mm kalınlığındaki re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -0,44 bulunmuştur (Xiao v.d. 2019). Ayrıca, düşey uzunluğu 100 mm, yatay uzunluğu 50 mm olan 2 mm kalınlığındaki re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -1,78 olarak hesaplanmıştır (Baran ve Öztürk 2020). Buna ilaveten, düşey uzunluğu 20 mm, yatay uzunluğu 40 mm olan re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -0,5 olarak belirlenmiştir (Li v.d. 2017). Diğer bir çalışmada, düşey uzunluğu 10 mm, yatay uzunluğu 10 mm olan 1 mm kalınlığındaki re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -0,45 olarak hesaplanmıştır (Peng v.d. 2020). Ek olarak bir çalışmada, düşey uzunluğu 21 mm, yatay uzunluğu 6 mm olan re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -0,8 olarak bulunmuştur (Yao v.d. 2020). Ayrıca, düşey uzunluğu 10 mm, yatay uzunluğu 20 mm olan re-entrant şekilli geometrinin Poisson oranı -0,5 olarak ölçülmüştür (Zhang v.d. 2018).

Üretilen re-entrant kafes geometrili deney numunelerinin elde edilen çekme deneyi sonuçlarına göre; re-entrant geometrili numunelerin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri sırasıyla Çizelge 4.3'te gösterilmektedir. Çizelge 4.3 incelendiğinde, ISO 527 standardında bir PLA'nın Poisson oranı, çekme dayanımı ve elastik modül özelliklerine göre, re-entrant şekilli kafes geometrili numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Re-H60L40A800 kodlu numunenin en düşük negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu numune diğer numunelerle karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ökzetik özellik göstermesi beklenen iç bükey re-entrant geometrinin, negatif Poisson oranına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi re-entrant şekilli numunelerden Re-H40L45A850, Re-H50L45A850 ve Re-H50L40A825-1 kodlu numunelerin, sıfıra yakın ve pozitif Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi, üretim esnasında kullanılan 3d yazıcının kalibrasyon ve hassasiyetinden kaynaklanan teknik kısıtlamalardır. Re-H60L40A800 kodlu numunenin çekme dayanımı, standart PLA ile karşılaştırıldığında, çekme dayanımı standarda göre %11 düşük ölçülmüştür. Bunun sebebi numunenin içerisindeki re-entrant geometrili boşluklardan kaynaklanan, yeterli dayanıma ulaşmadan kırılan, küçük kesit alanlarıdır.

Çizelge 4.3. Re-entrant geometrili ökzetik çekme deney numunelerinin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri

Numuneler	Poisson Oranı	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (MPa)
Standart PLA	0,37	49,5	35,35
Re-H40L35A825	-0,57	43,88	28,81
Re-H40L45A825	-0,63	35,93	28,03
Re-H60L35A825	-0,2	40,16	29,68
Re-H60L45A825	-0,33	34,15	25,94
Re-H40L40A800	-0,14	43,88	33,44
Re-H40L40A850	0,31	41,24	31,82
Re-H60L40A800	-0,82	43,93	31,52
Re-H60L40A850	-0,02	32,22	27,82
Re-H50L35A800	-0,15	15,92	20,56
Re-H50L35A850	-0,11	15,5	20,18
Re-H50L45A800	-0,07	15,46	17,59
Re-H50L45A850	0,12	20,64	17,25
Re-H50L40A825-1	0,02	19,46	21,09
Re-H50L40A825-2	-0,15	18,52	22,46
Re-H50L40A825-3	-0,07	18,71	21,83

Deney sonuçları SPSS istatistik programı yardımıyla analiz edilerek sonuçların belirlenmesinde etkisi en yüksek olan parametre belirlenmiştir. Buna göre re-entrant çekme numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden deney parametreleri Çizelge 4.4'te gösterilmektedir. Çizelge 4.4 incelendiğinde, A (iki dal arası açı) değişkeninin re-entrant çekme numunelerinin Poisson oranına etkisinin en yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu numunelerin çekme dayanımına, H (kafes geometri yüksekliği) değişkeninin etkisinin en yüksek olduğu görülmektedir. Re-entrant geometrili basma numunelerinin Poisson oranına ise L ve A (yatay iki dal arası açı) değişkenlerinin etkisinin en yüksek olduğu görülmektedir. Re-entrant geometrili basma numunelerinin basma dayanımına en çok etki eden parametre L olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Re-entrant geometrili ökzetik deney numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden faktörler

Değişkenler	Çekme deneyi Poisson oranına etki faktörleri	Çekme deneyi çekme dayanımına etki faktörleri	Basma deneyi Poisson oranına etki faktörleri	Basma deneyi basma dayanımına etki faktörleri
H	0,5	0,981	0,806	0,875
L	0,111	0,956	0,932	1
A	0,95	0,959	0,463	0,83
H*L	0,078	0,656	0,633	0,457
H*A	0,679	0,977	0,434	0,912
L*A	0,28	0,941	0,991	0,94
H*L*A	0	0	0	0

Üretilen eğri kafes geometrili deney numunelerinin elde edilen çekme deneyi sonuçlarına göre; eğri geometrili numunelerin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri sırasıyla Çizelge 4.5'te gösterilmektedir. Çizelge 4.5 incelendiğinde, eğri şekilli kafes geometrili numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, E-R125D15 kodlu numunenin en yüksek negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, E-R150D15 kodlu numune diğer numunelerle karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ökzetik özellik göstermesi beklenen iç bükey eğri geometrinin, negatif Poisson oranına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ancak, Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi eğri şekilli numunelerden E-R100D12, E-R100D10-1, E-R100D10-2 ve E-R100D10-3 kodlu numunelerin, sıfıra yakın ve pozitif Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi, üretim esnasında kullanılan 3d yazıcının kalibrasyon ve hassasiyetinden kaynaklanan teknik kısıtlamalardır. E-R150D15 kodlu numunenin çekme dayanımı, standart PLA ile karşılaştırıldığında, çekme dayanımı standarda göre %18 düşük ölçülmüştür. Bunun sebebi numunenin içerisindeki re-entrant geometrili boşluklardan kaynaklanan, yeterli dayanıma ulaşmadan kırılan, küçük kesit alanlarıdır.

Çizelge 4.5. Eğri geometrili ökzetik çekme deney numunelerinin Poisson oranları, çekme dayanımları ve elastik modülleri

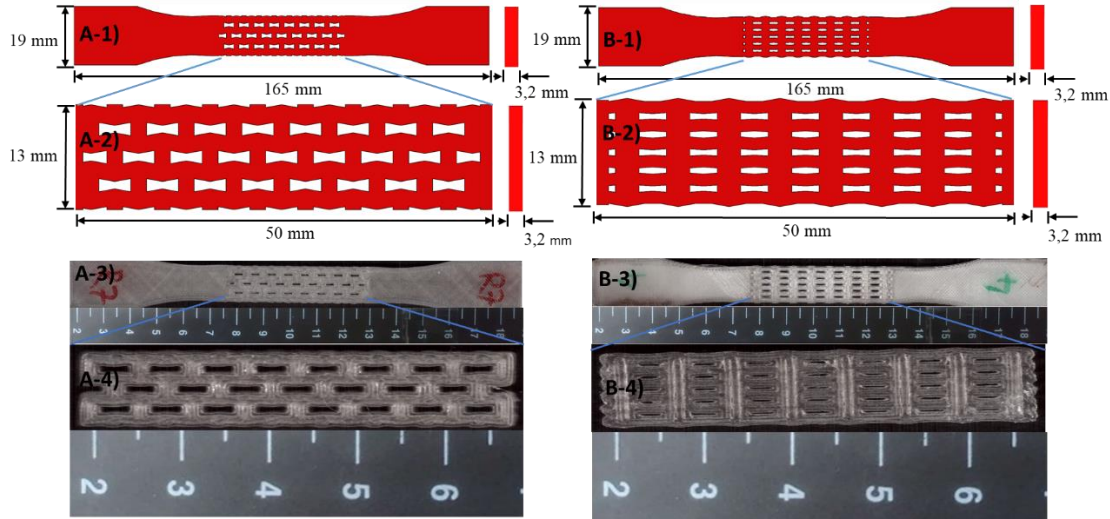
Numuneler	Poisson Oranı	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (MPa)
Standart PLA	0,37	49,5	35,35
E-R150D15	-0,18	40,67	27,74
E-R150D12	-0,21	35,54	26,42
E-R150D10	-0,2	6,21	5,01
E-R125D15	-0,69	17,58	26,72
E-R125D12	-0,36	17,15	19,66
E-R125D10	-0,28	9,67	14,47
E-R100D15	-0,33	15,4	17,42
E-R100D12	0,04	38,51	30,39
E-R100D10-1	0,36	7,83	5,79
E-R100D10-2	0,02	7,42	5,57
E-R100D10-3	0,16	7,99	5,72

Buna göre eğri çekme numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden parametreler Çizelge 4.6'da gösterilmektedir. Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere R (eğri yarıçapı) değişkeninin eğri çekme numunelerinin Poisson oranına etkisinin en yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu numunelerin çekme dayanımına etkisinin tüm değişkenler için benzer olduğu görülmüştür. Eğri geometrili basma numunelerinin Poisson oranına etki eden R ve D değişkenlerinin basma numunelerinin Poisson oranına etkisi en yüksek olduğu görülmektedir. Eğri geometrili basma numunelerinin basma dayanımına en çok etki eden parametre R ve D olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Eğri geometrili ökzetik deney numunelerinin mekanik özelliklerine etki eden faktörler

Değişkenler	Çekme deneyi Poisson oranına etki faktörleri	Çekme deneyi çekme dayanımına etki faktörleri	Basma deneyi Poisson oranına etki faktörleri	Basma deneyi basma dayanımına etki faktörleri
R	0,827	0,999	0,028	0,821
D	0,73	1	0,06	0,226
R*D	0,622	1	0,289	0,947

En yüksek negatif Poisson oranı özelliği gösteren Re-H60L40A800 ve E-R125D15 kodlu numunelerin SOLIDWORKS ortamında çizimleri ve 3d yazıcıda üretilen parçaları Resim 4.2'de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Mekanik özellik olarak en düşük sonuç veren negatif Poisson oranına sahip şekiller: A-1) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; A-2) Re-entrant kafes geometri CAD çizimi; A-3) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; A-4) Re-entrant kafes geometri 3d yazıcıda üretilmiş form; B-1) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; B-2) Eğri kafes geometri CAD çizimi; B-3) Eğri kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; B-4) Eğri kafes geometri 3d yazıcıda üretilmiş form.

Literatür incelendiğinde iki dal arası açının 45° olduğu, birim hücre içerisinde; 8 mm düşey uzunluk ve 5 mm yatay uzunluğa sahip re-entrant basma numunelerinin (düşey uzunluk 46 mm, yatay uzunluk 75 mm), Poisson oranı -0,23 olarak ölçülmüştür (Jiang v.d. 2020). Diğer bir çalışmada iki dal arası açının 45° olduğu, birim hücre içerisinde; 8 mm düşey uzunluk ve 12 mm yatay uzunluğa sahip re-entrant basma numunelerinin (düşey uzunluk 48 mm, yatay uzunluk 76 mm), Poisson oranı -0,40 olarak ölçülmüştür (Dong v.d. 2019). Re-entrant dal kalınlığını inceleyen başka bir çalışma 0,15 Poisson oranı elde etmiştir (Xiao v.d. 2019). İki dal arası açının 80° olduğu, birim hücre içerisinde; 4 mm düşey uzunluk ve 2 mm yatay uzunluğa sahip re-entrant basma numunelerinin Poisson oranı -0,34 olarak ölçülmüştür (Carneiro v.d. 2019). Ayrıca, iki dal arası açının 45° olduğu, birim hücre içerisinde; 20 mm düşey uzunluk ve 5 mm yatay uzunluğa sahip re-entrant basma numunelerinin Poisson oranı -0,23 olarak hesaplanmıştır (Carneiro ve Puga 2018). Ek olarak, iki dal arası açının 60° olduğu, birim hücre içerisinde; 20 mm düşey uzunluk ve 15 mm yatay uzunluğa sahip re-entrant basma numunelerinin Poisson oranı -0,25 olarak bulunmuştur (Quan v.d. 2020).

Üretilen re-entrant kafes geometrili deney numunelerinin elde edilen basma deneyi sonuçlarına göre; re-entrant geometrili numunelerin Poisson oranları, Çizelge 4.7’de

gösterilmektedir. Çizelge 4.7 incelendiğinde, re-entrant şekilli kafes geometrili numunelerin sonuçları, Re-H45L35A50 kodlu numunenin en yüksek negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi re-entrant şekilli numunelerden Re-H40L50A50 ve Re-H45L50A60-1 kodlu numunelerin, sıfıra yakın ve pozitif Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi, deney sırasında ekstensiyometrenin hatalı okuma yapması veya üretilen basma deney numunelerinin teknik kısıtlamalardan dolayı kenarları kapalı biçimde üretilmesidir.

Çizelge 4.7. Re-entrant geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranları

Numuneler	Poisson Oranı
Standart PLA	0,37
Re-H40L35A60	-0,18
Re-H40L65A60	-0,05
Re-H55L35A60	-0,32
Re-H55L65A60	-0,04
Re-H40L50A50	0,01
Re-H40L50A70	-0,08
Re-H55L50A50	-0,14
Re-H55L50A70	-0,13
Re-H45L35A50	-0,73
Re-H45L35A70	-0,17
Re-H45L65A50	-0,04
Re-H45L65A70	-0,67
Re-H45L50A60-1	-0,01
Re-H45L50A60-2	-0,06
Re-H45L50A60-3	-0,09

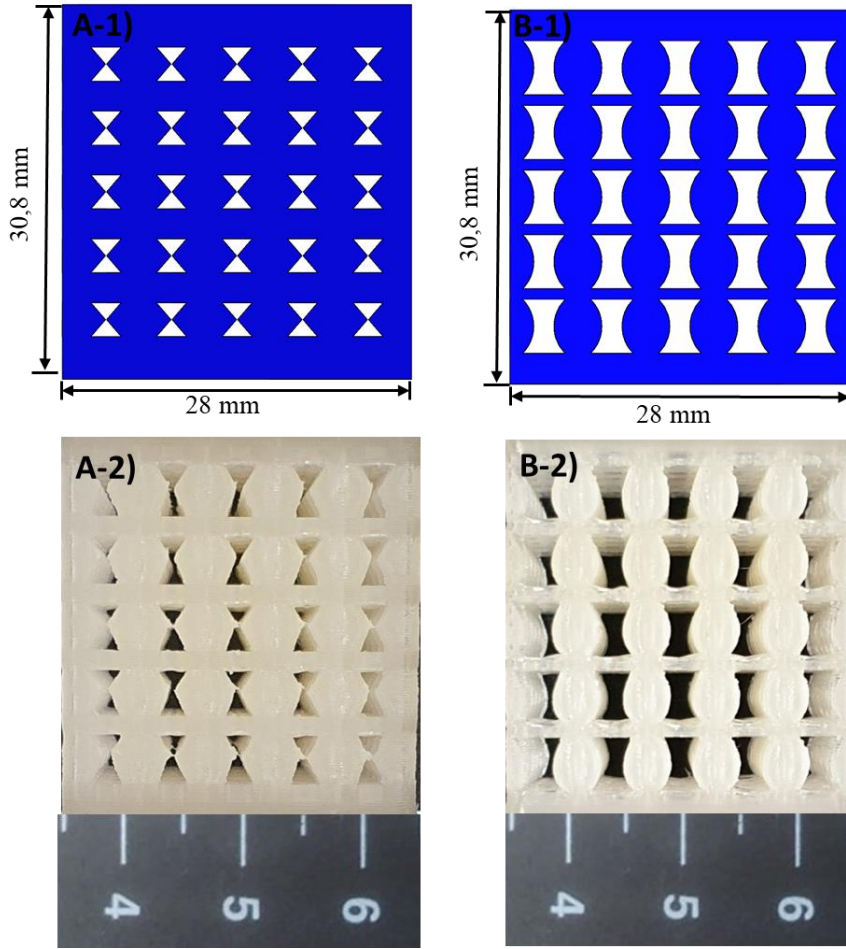
Üretilen eğri kafes geometrili deney numunelerinin elde edilen basma deneyi sonuçlarına göre; eğri geometrili numunelerin Poisson oranları, Çizelge 4.8’de gösterilmektedir. Çizelge 4.8 incelendiğinde, eğri şekilli kafes geometrili numunelerin sonuçları, E-R450D12 kodlu numunenin en yüksek negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Ancak, Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi eğri şekilli numunelerin Poisson oranları oldukça yakın değerler sergilemektedir. Bunun sebebi, basma numunelerinde eğri yarıçapı ve dal kalınlığı değişkenlerinin Poisson oranına etkisinin olmaması veya belirlenen parametrelerin bu değişimi yansıtmaması olarak sıralanabilir.

Çizelge 4.8. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranları

Numuneler	Poisson Oranı
Standart PLA	0,37
E-R450D15	-0,09
E-R450D12	-0,15
E-R450D10	-0,11
E-R325D15	-0,12
E-R325D12	-0,12
E-R325D10	-0,13
E-R200D15	-0,14
E-R200D12	-0,12
E-R200D10-1	-0,14
E-R200D10-2	-0,14
E-R200D10-3	-0,06

En yüksek negatif Poisson oranı özelliği gösteren Re-H45L35A50 ve E-R450D12 kodlu numunelerin SOLIDWORKS ortamında çizimleri ve 3d yazıcıda üretilen parçaları Resim 4.3’te gösterilmiştir.



Resim 4.3. Mekanik özellik olarak en düşük sonuç veren negatif Poisson oranına sahip şekiller: A-1) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; A-2) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; B-1) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; B-2) Eğri kafes geometrili çekme numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form.

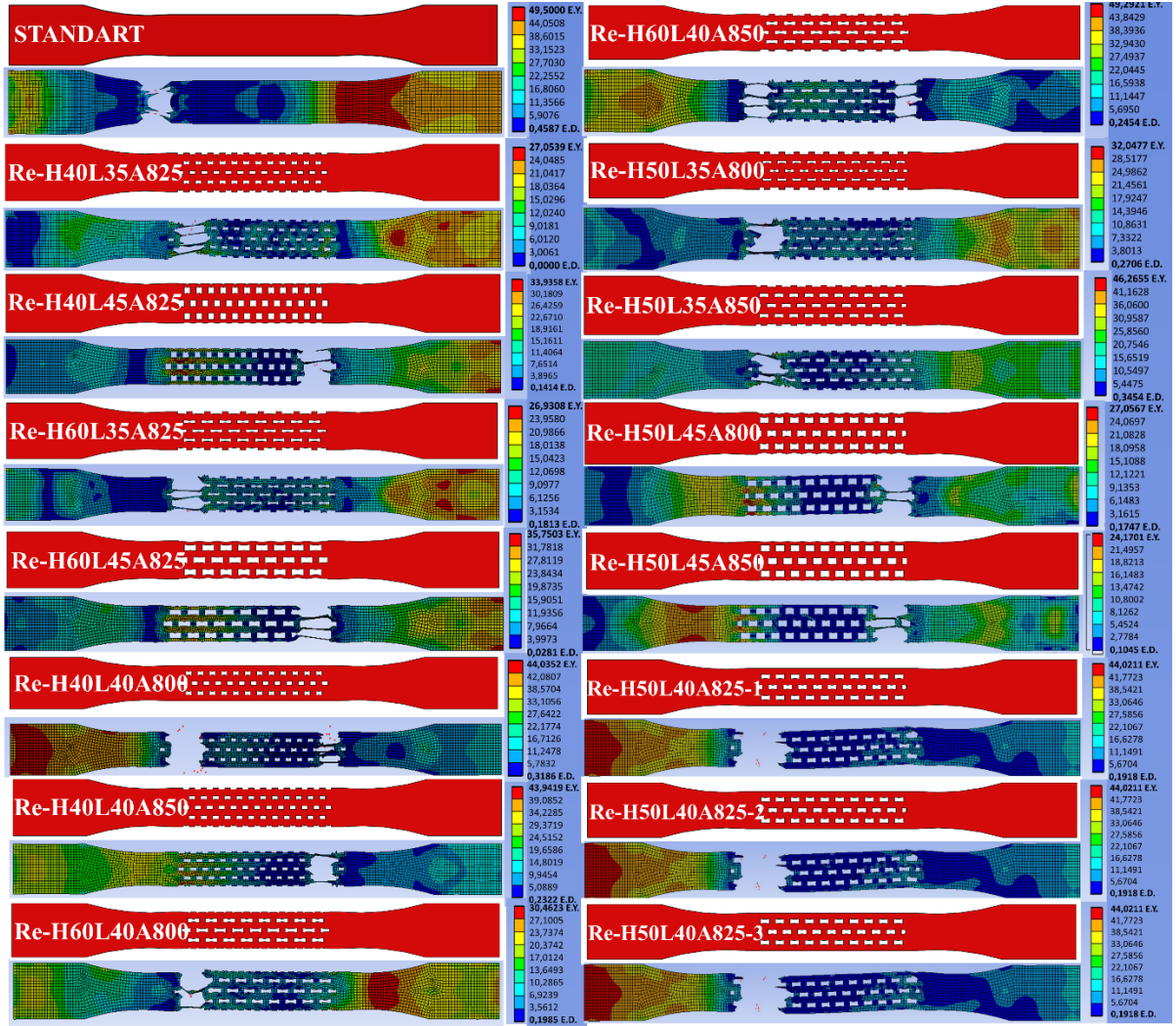
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ İLE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN KONTROLÜ VE DOĞRULANMASI

Üretilen tüm çekme ve basma numunelerinin (re-entrant geometri ve eğri geometri), ANSYS isimli sonlu elemanlar analizi simülasyon programı ortamında test edilmiş ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar gerçekleştirilen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

5.1. Kafes Yapıların Çekme ve Basma Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analizi ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

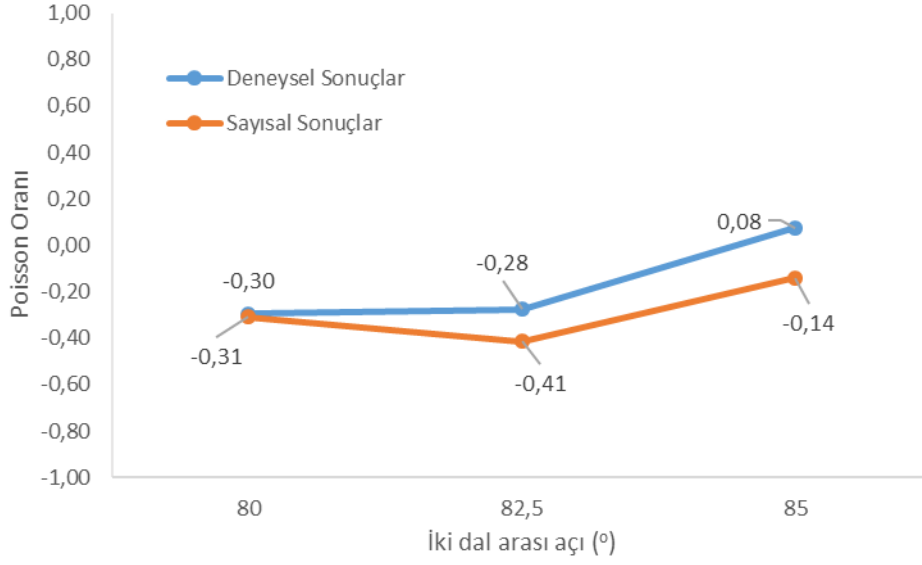
Re-entrant gözenek geometrili 15 çekme deney numunesinin 3d olarak SOLIDWORKS çizimleri ve ANSYS ortamında simülasyon olarak çekme deneylerine tabi tutulması gerçekleştirilmiştir.

Literatürdeki sonlu eleman analizi ile re-entrant geometrilerin Poisson oranını araştıran çalışmalar incelendiğinde, düşey uzunluğu 100 mm, yatay uzunluğu 100 mm ve dal açısı 45° olan kafes geometrilerin Poisson oranı -2,4 olarak bulunmuştur (Cong v.d. 2019). Ayrıca, düşey uzunluğu 8 mm, yatay uzunluğu 12 mm ve dal açısı 45° olan kafes geometrilerin Poisson oranı -0,15 olarak ölçülmüştür (Dong v.d. 2019). Ek olarak, düşey uzunluğu 20 mm, yatay uzunluğu 10 mm ve dal açısı 30° olan kafes geometrilerin Poisson oranı -1 olarak ölçülmüştür (Fu v.d. 2017). Buna ilaveten, düşey uzunluğu 10 mm, yatay uzunluğu 5 mm ve dal açısı 60° olan kafes geometrilerin Poisson oranı -0,4 olarak ölçülmüştür (Wang v.d. 2015b). Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



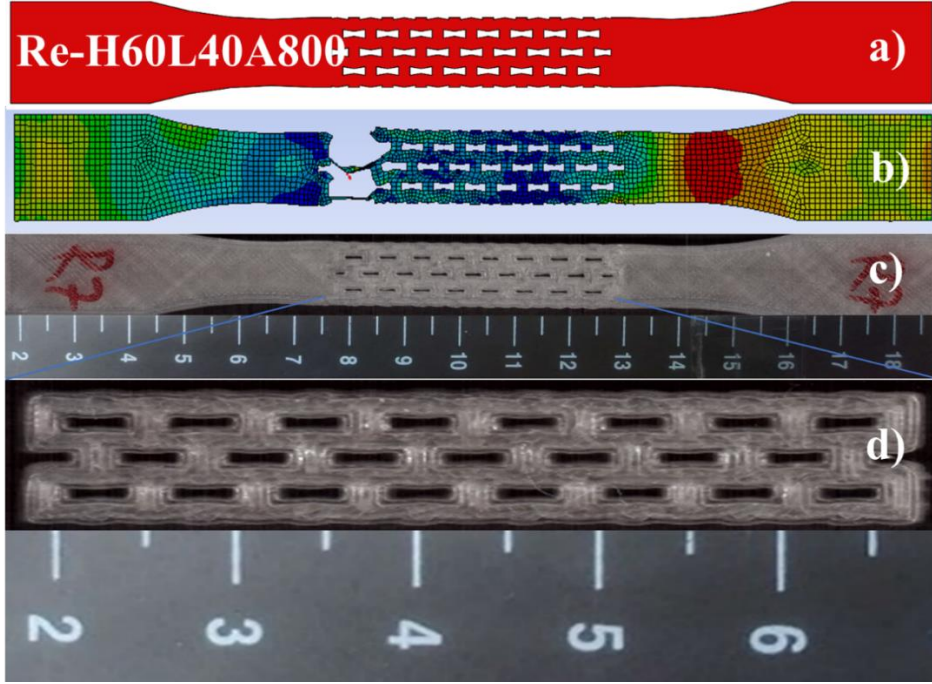
Şekil 5.1. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları

Poisson oranı, malzemenin kafes geometrisindeki içbükey veya dışbükey olma durumuna göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, Şekil 5.1’de gösterilen re-entrant geometrili çekme deney numunelerinin deney sonuçları iki dal arasındaki açı değişkenine göre Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Yapılan deneyler, ANSYS sonlu eleman analizi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2 incelendiğinde deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıkların sebebi, sonlu elemanlar analizi çalışmalarında kullanılan mesh geometrisinin yeterince hassas olmamasıdır. Bu mesh geometrisi, yüksek güç ve işlemciye sahip bir bilgisayar yardımıyla geliştirilebilir.



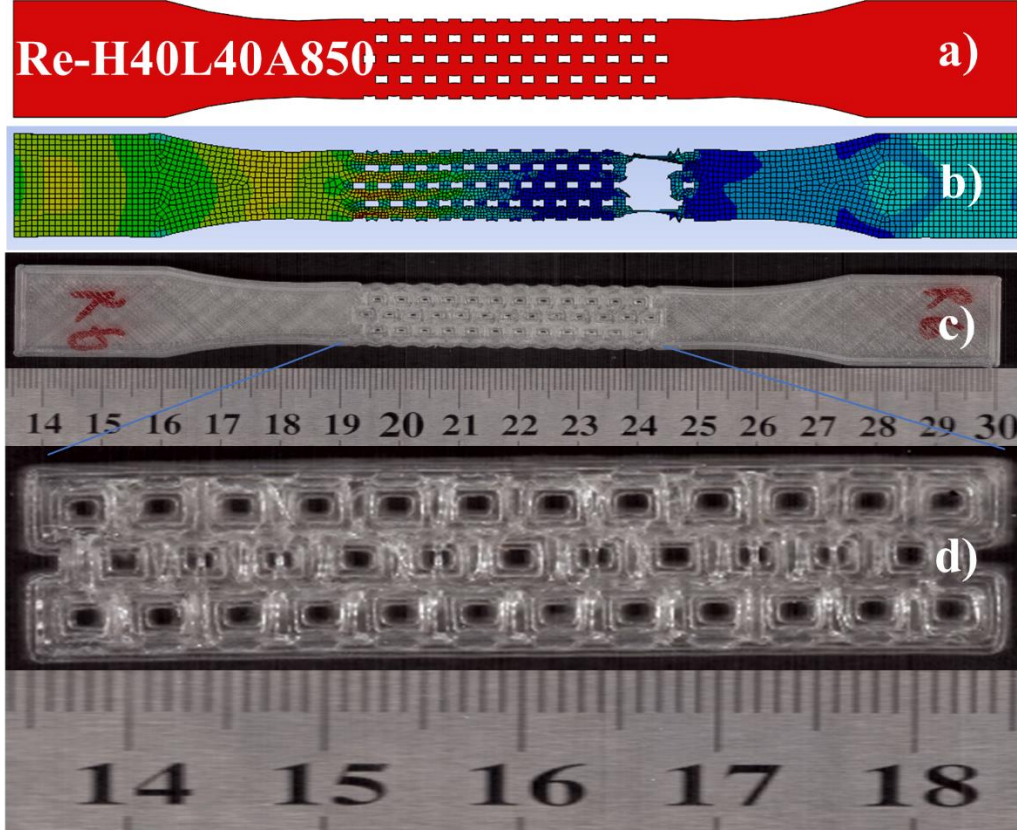
Şekil 5.2. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

Re-entrant geometrili çekme numunelerinden en düşük negatif Poisson oranı içeren Re-H60L40A800 numunesi Resim 5.1’de gösterilmektedir. Bu numunenin negatif Poisson oranı değerinin yüksekliği iki dal arasındaki açının diğer numunelerden daha dar (içbükeylik) olmasından kaynaklanmaktadır.



Resim 5.1. En düşük negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H60L40A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.

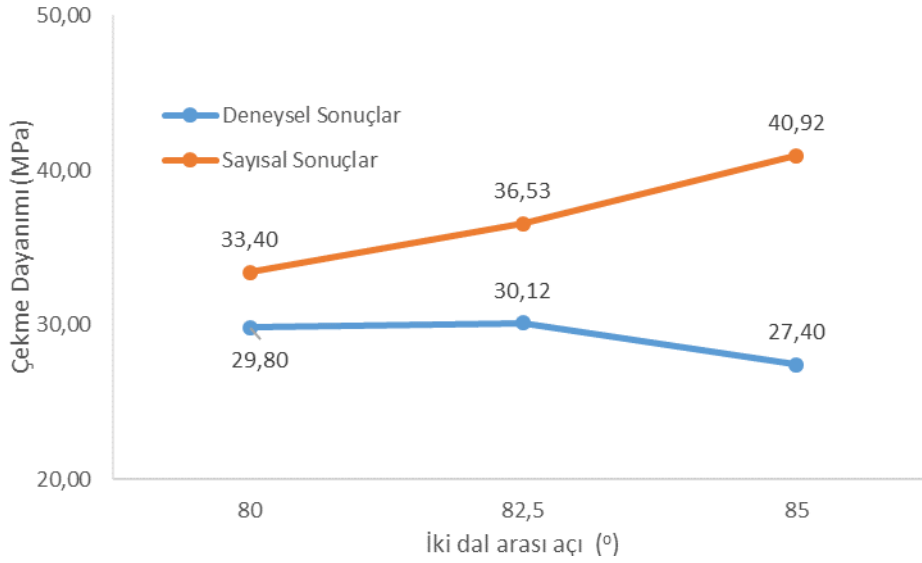
Re-entrant geometrili çekme numunelerinden en yüksek Poisson oranı sonucu veren Re-H40L40A850 numunesi Resim 5.2’de gösterilmektedir. Bunun sebebi, iki dal arasındaki açının diğer numunelerden daha geniş (içbükeylik) olmasıdır. Buna ilaveten Resim 5.2’de görüldüğü gibi, tasarlanan iç açının 85° olmasına rağmen 3d yazıcı kalitesinden kaynaklanan üretim incelendiğinde gözenekler kare şekline benzemektedir. Sonuç olarak bu geometrinin içbükeyliği tam olarak elde edilememiştir. Bu nedenle Poisson oranı sıfıra yakın olarak sonuçlanmıştır.



Resim 5.2. En yüksek Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H40L40A850: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, re-entrant şekilli geometrilerin Poisson oranı bu geometrilerin iki dal arasındaki açı arttıkça negatif Poisson oranının azaldığını göstermektedir. Teorik olarak iki dal arasındaki açının 90° olması durumunda Poisson oranının sıfır, bu açının daralması sonucunda Poisson oranının negatif, genişlemesi durumunda ise Poisson oranının pozitif olduğu bilinmektedir (Carneiro v.d. 2019). Deney sonuçlarında 85° 'nin pozitif Poisson oranı değeri göstermesi, üretim sırasındaki hassasiyetin yeterince iyi olmamasından kaynaklanmaktadır.

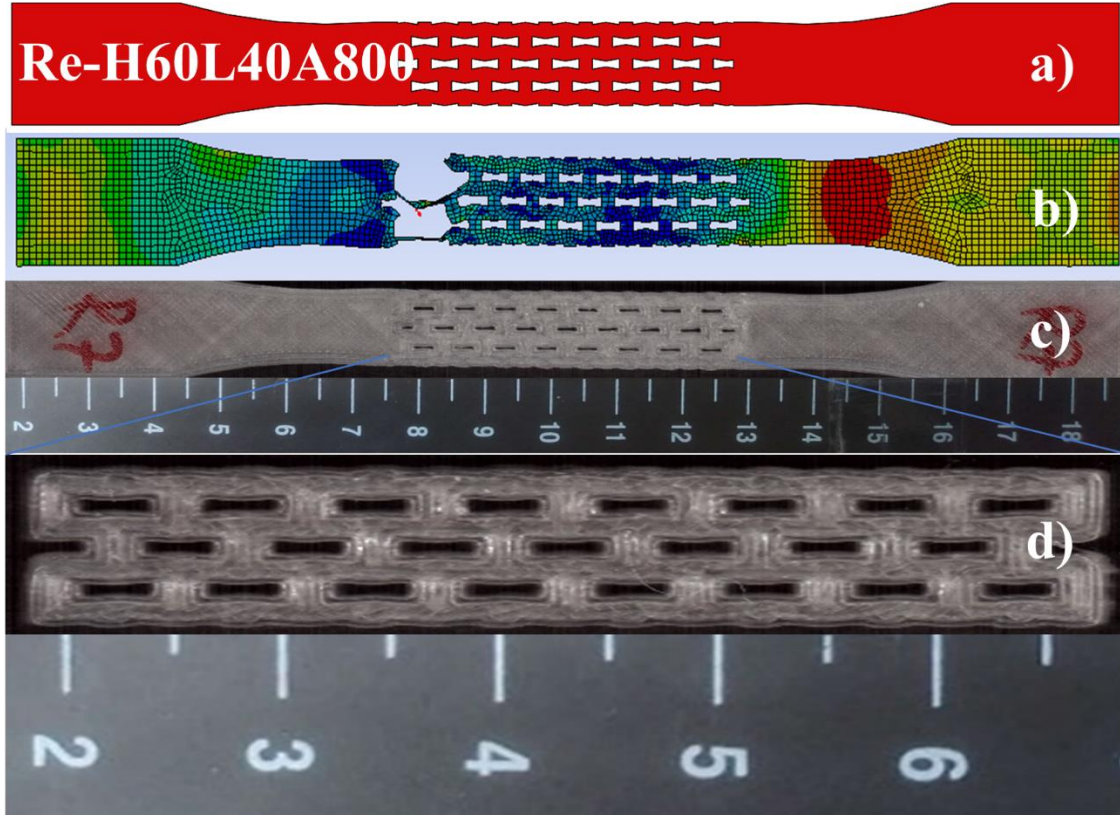
Çekme deney numunelerinin çekme dayanımı sonuçları iki dal arasındaki açı değişkenine göre Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Yapılan deneyler, ANSYS sonlu eleman analizi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.3. Re-entrant şekilli çekme deney numunelerinin çekme dayanımlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

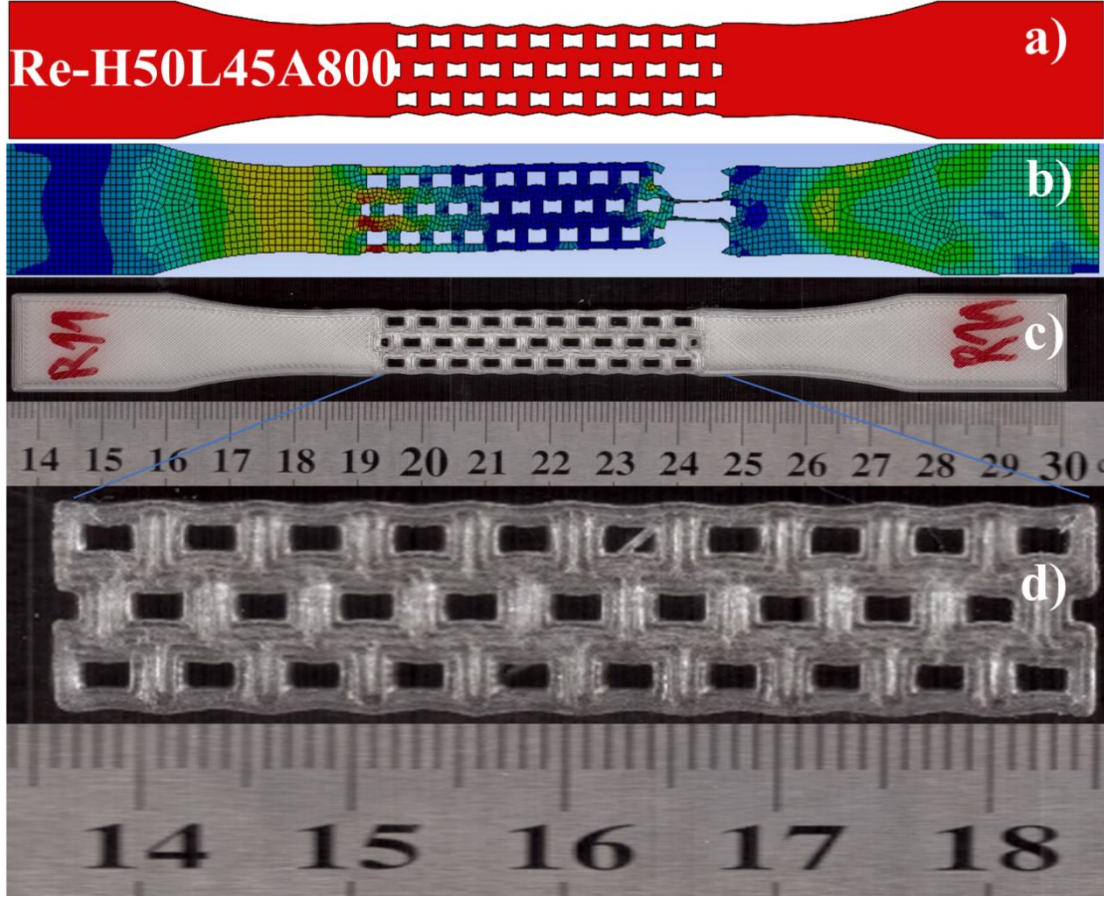
Bu sonuçlar incelendiğinde re-entrant geometrili numunelerin boşluklu yapıda olması, bu yapıların PLA standart çekme dayanımı (49,5 MPa) değerine ulaşamadığının göstergesidir. İki dal arasındaki açı arttıkça teorik olarak numunelerin kopma yeri olan en küçük kesit alanında artış gözlemlenmektedir. Buna rağmen deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Bu farklılıkların sebepleri arasında, deneysel numunelerin üretimi gerçekleştirilirken kullanılan filamentin kalitesi, kullanılan 3d yazıcının performansı, üretilen numunenin uygun saklama koşullarında saklanamaması, deney esnasında kullanılan deney düzeneğinin kalibrasyonunun doğru olmaması, tutucu çenelerin yeterince sıkı olmaması gösterilebilir. Bununla birlikte simülasyonların gerçekleştirildiği bilgisayar işlemcisinin yeterli olmaması, mesh adet ve kalitesinin istenilen şartları karşılayamaması gösterilebilir.

Re-entrant geometrili çekme numunelerinden en yüksek çekme dayanımı içeren Re-H60L40A800 numunesi Resim 5.3'te gösterilmektedir. Bu numunenin çekme dayanımının yüksekliği ökzetik bölge üzerindeki en küçük kesit alanının diğer numunelerden daha geniş olmasından kaynaklanmaktadır.



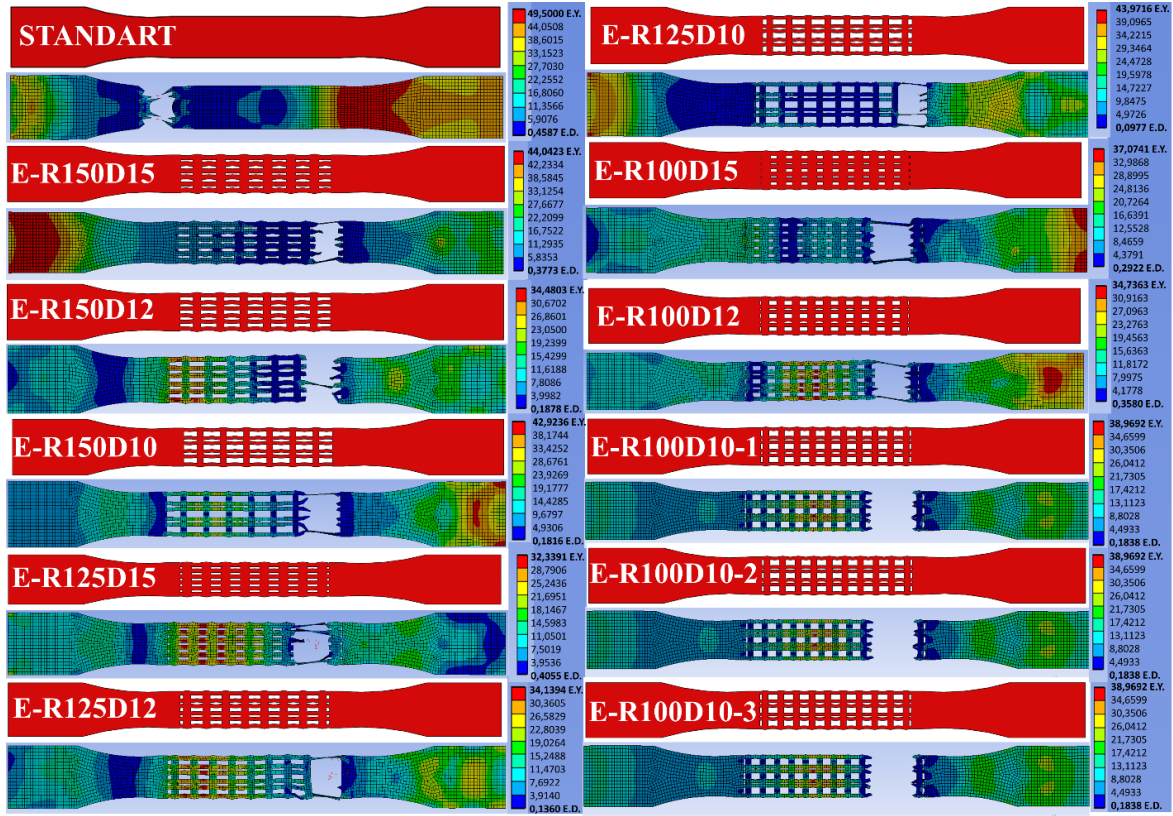
Resim 5.3. En yüksek çekme dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H60L40A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.

Re-entrant geometrili çekme numunelerinden en düşük çekme dayanımı sonucu veren Re-H50L45A800 numunesi Resim 5.4’te gösterilmektedir. Bu numunenin düşük değerde sonuç verme sebebi, ökzetik bölge üzerindeki en küçük kesit alanının diğer numunelerden çok daha dar olmasıdır.



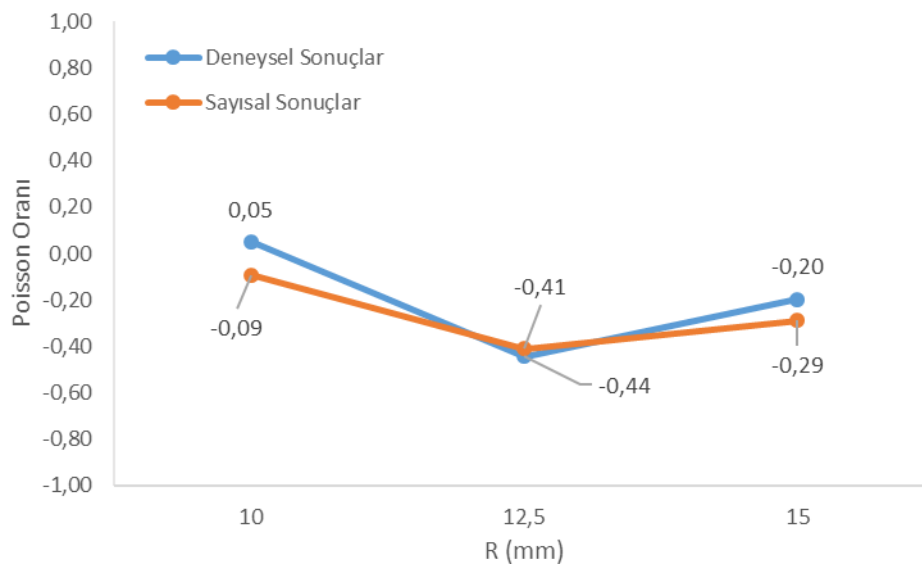
Resim 5.4. En düşük çekme dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H50L45A800: a) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Re-entrant kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.

Eğri gözenek geometrili 11 çekme deney numunesinin 3d olarak SOLIDWORKS çizimleri ve ANSYS ortamında simülasyon olarak çekme deneylerine tabi tutulması gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te gösterilmektedir.



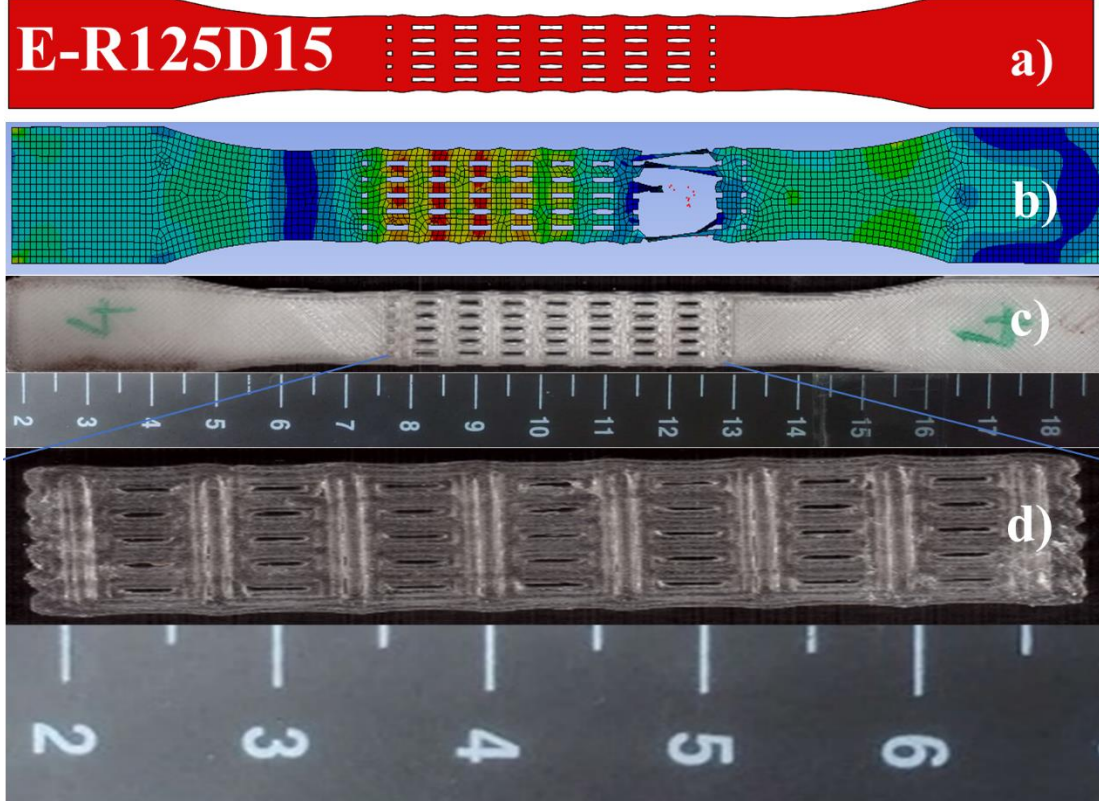
Şekil 5.4. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları

Şekil 5.4'te gösterilen eğri geometrili çekme deney numunelerinin deney sonuçları eğrilerin yarıçap değişkenine göre Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Yapılan deneyler, ANSYS sonlu eleman analizi ile karşılaştırılmıştır.



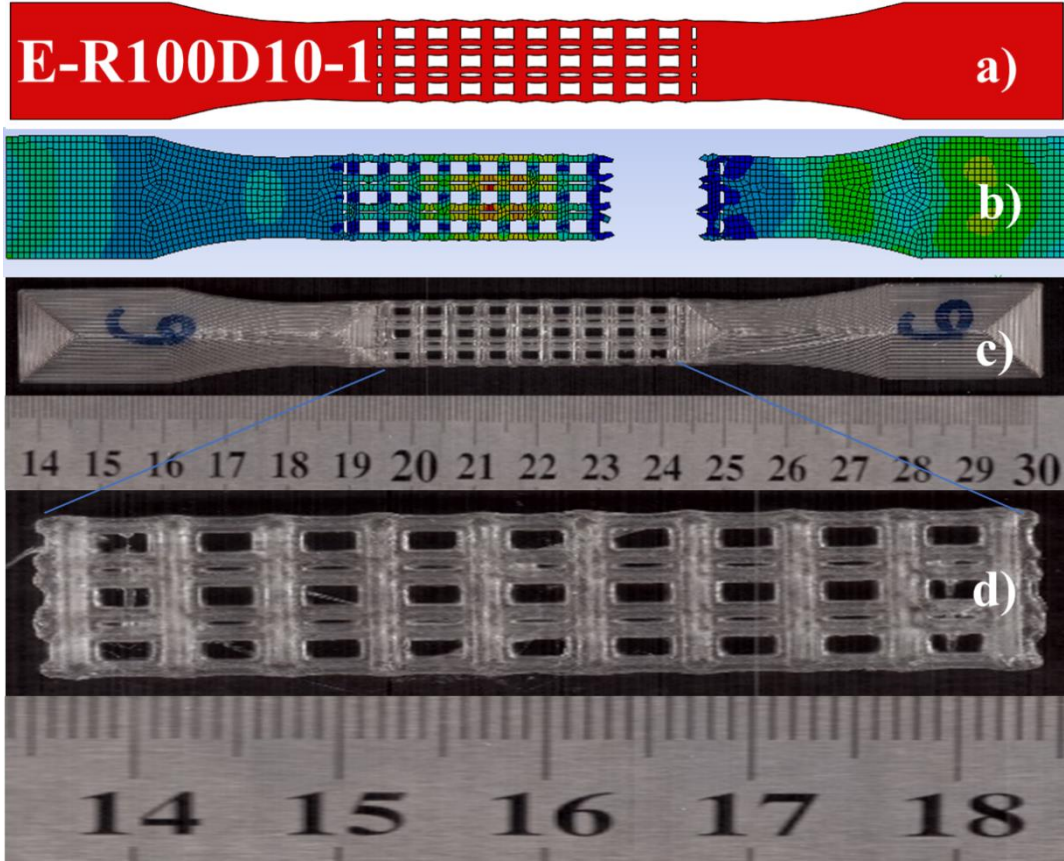
Şekil 5.5. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

Şekil 5.5 incelendiğinde deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Eğri geometrili çekme numunelerinden en düşük negatif Poisson oranı içeren E-R125D15 numunesi Resim 5.5’te gösterilmektedir. Bu numunenin negatif Poisson oranı değerinin yüksekliği eğri yarıçapından kaynaklanan içbükeyliktir.



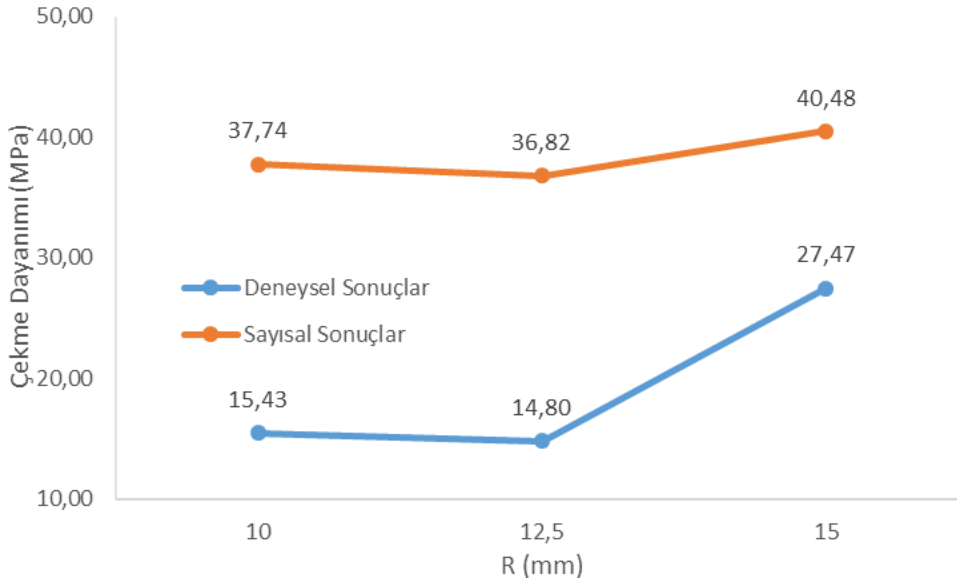
Resim 5.5. En düşük negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R125D15: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.

Eğri geometrili çekme numunelerinden en yüksek Poisson oranı sonucu veren E-R100D10-1 numunesi Resim 5.6’da gösterilmektedir. Bu numunenin yüksek negatif Poisson oranı sonucu verme sebebi eğri yarıçapının içbükeylik oluşturamamasıdır. Buna ilaveten Resim 5.6’da görüldüğü gibi, tasarlanan geometrideki istenilen eğriliğe üretilen geometride tam çözünürlükte ulaşılammıştır. 3d yazıcı kalitesinden kaynaklanan bu problem, deney sonuçlarını olumsuz etkilemiştir.



Resim 5.6. En yüksek Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R100D10-1: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.

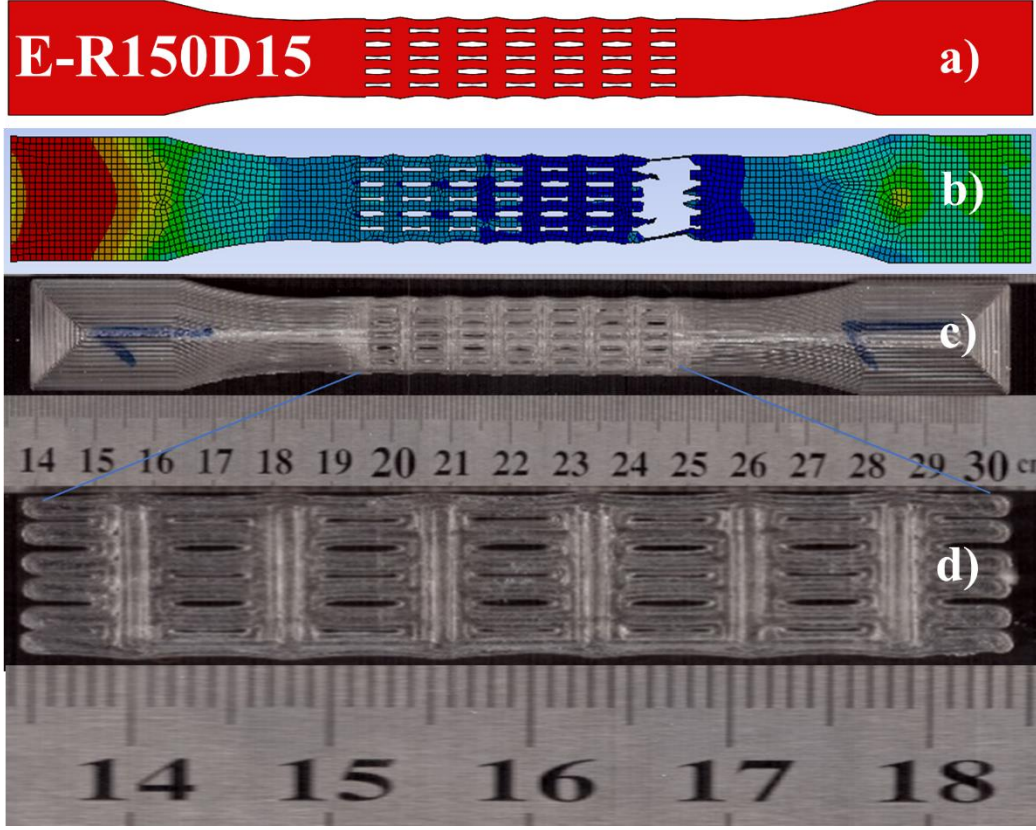
Elde edilen sonuçlara göre eğri geometrilerin yarıçap değişkeni çekme numunesinin boyutları göz önüne alındığında, ne çok büyük ne de çok küçük olmalıdır. Negatif Poisson oranı içeren en uygun değer -0,44 ile 12,5 mm yarıçapa sahip eğri geometrilerdir.



Şekil 5.6. Eğri şekilli çekme deney numunelerinin çekme dayanımlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

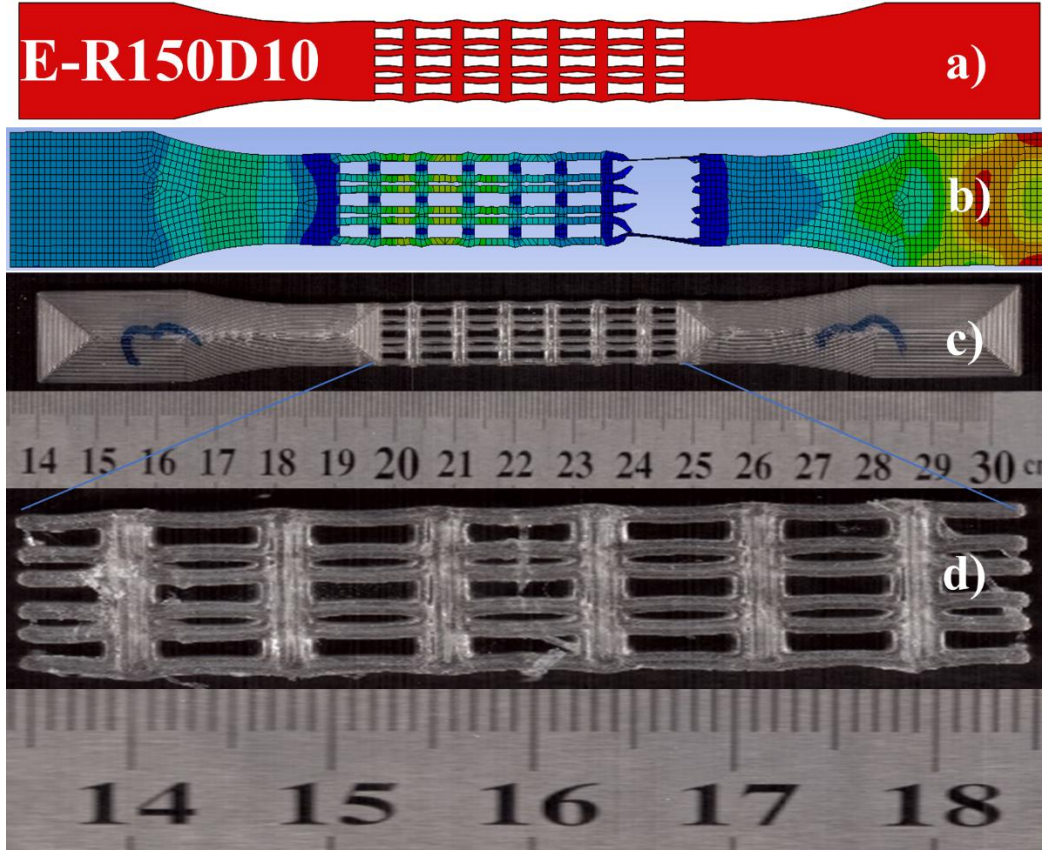
Şekil 5.6 incelendiğinde deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında farklılıklar görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde eğri geometrili numunelerin boşluklu yapıda olması, bu yapıların PLA standart çekme dayanımı (49,5 MPa) değerine ulaşamadığının göstergesidir. Buna ilaveten, yarıçaptaki artış, teorik olarak numunelerin kopma yeri olan en küçük kesit alanında artışa sebep olur. Bundan dolayı yarıçap değeri 15 mm olan numunenin çekme dayanımı (27,47 MPa) en yüksek değerdedir.

Eğri geometrili çekme numunelerinden en yüksek çekme dayanımı içeren E-R150D15 numunesi Resim 5.7’de gösterilmektedir. Bu numunenin çekme dayanımının yüksekliği ökzetik bölge üzerindeki en küçük kesit alanının diğer numunelerden daha geniş olmasından kaynaklanmaktadır.



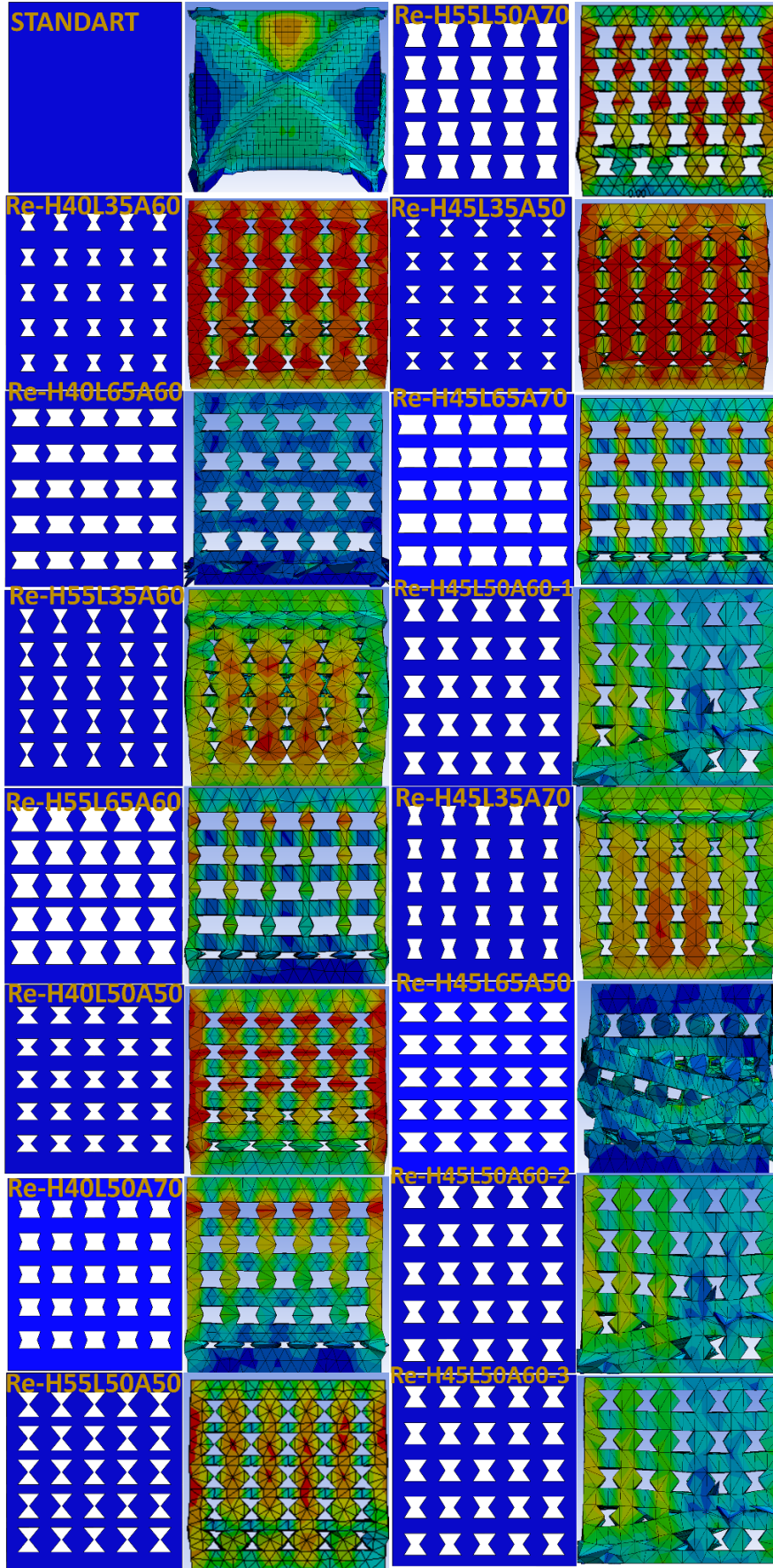
Resim 5.7. En yüksek çekme dayanımına sahip Eğri şekil, E-R150D15: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi ökzetik kısım.

Eğri geometrili çekme numunelerinden en düşük çekme dayanımı sonucu veren E-R150D10 numunesi Resim 5.8’de gösterilmektedir. Bunun sebebi, ökzetik bölge üzerindeki en küçük kesit alanının diğer numunelerden çok daha dar olmasından kaynaklanmaktadır.



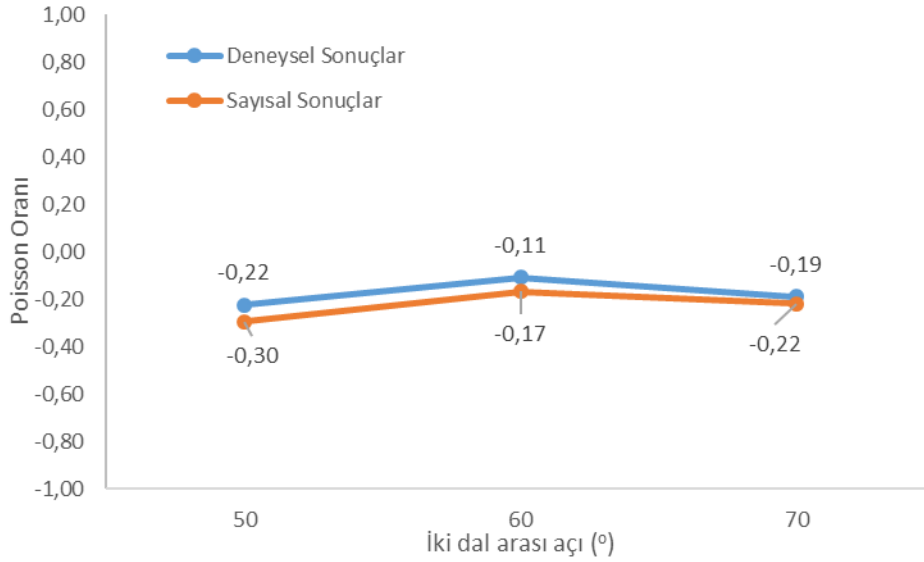
Resim 5.8. En düşük çekme dayanımına sahip Eğri şekil, E-R150D10: a) Eğri kafes geometrili çekme numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili çekme numunesi sonlu eleman analizi; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; d) Eğri kafes geometrili çekme numunesi özetik kısım.

Re-entrant gözenek geometrili 15 basma deney numunesinin 3d olarak SOLIDWORKS çizimleri ve ANSYS ortamında simülasyon olarak çekme deneylerine tabi tutulması gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



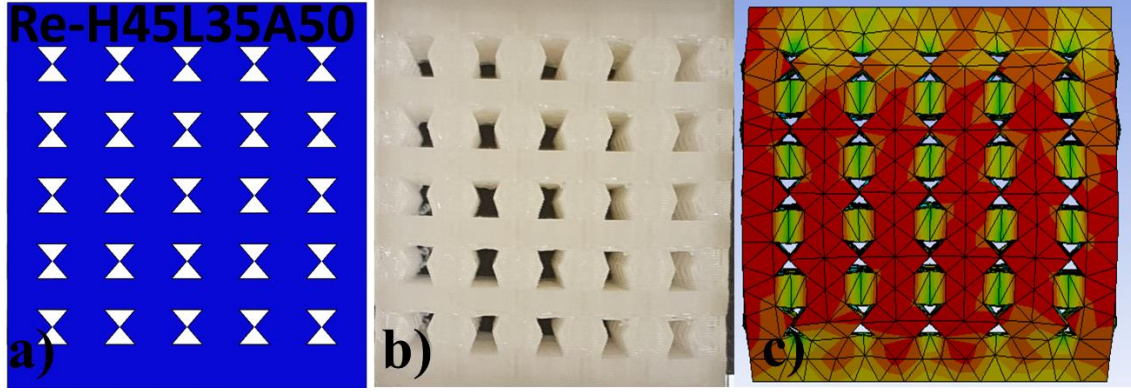
Şekil 5.7. Re-entrant şekilli basma deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları

Re-entrant geometrili basma deney numunelerinin Poisson oranları, yapılan deneyler sonucunda ANSYS analizleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.8’de gösterilmektedir. En düşük ve en yüksek değerler incelendiğinde, deneysel ve sayısal sonuçların aynı numuneleri işaret ettiği gözlemlenmesine rağmen, sayısal sonuçlardaki farklılıklar deney numunelerinin %100 doğrulukta üretilemediğini göstermektedir.



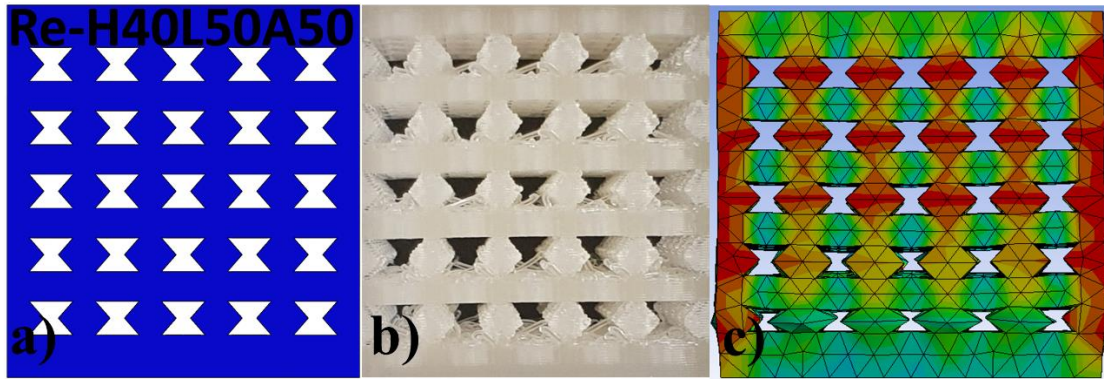
Şekil 5.8. Re-entrant geometrili öktetik basma deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması

Re-entrant geometrili basma numunelerinden en düşük negatif Poisson oranı içeren Re-H45L35A50 numunesi Resim 5.9’da gösterilmektedir. Bu numunenin negatif Poisson oranı değerinin yüksekliği iki dal arasındaki açının diğer numunelerden daha dar (içbükeylik) olmasından kaynaklanmaktadır.



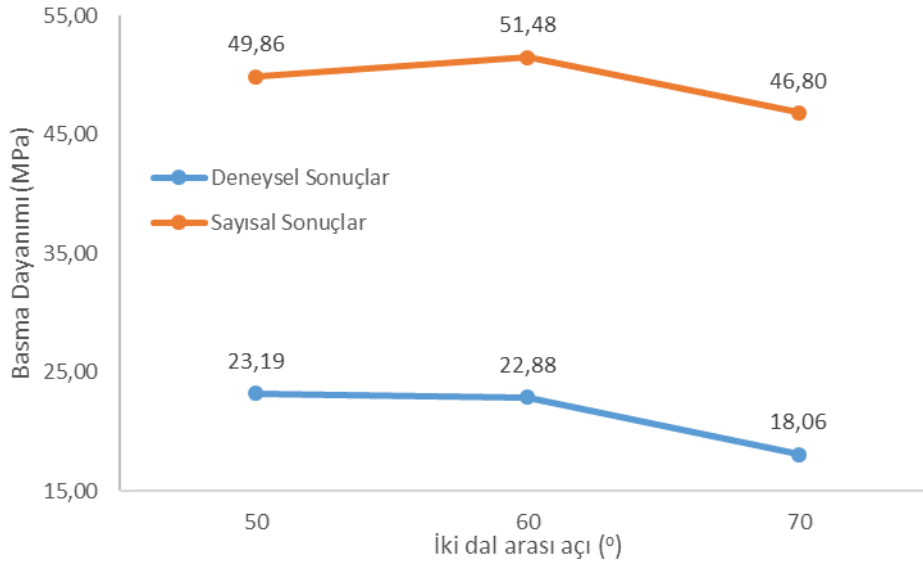
Resim 5.9. En düşük negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L35A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Re-entrant geometrili basma numunelerinden en yüksek Poisson oranı sonucu veren Re-H40L50A50 numunesi Resim 5.10'da gösterilmektedir. Bu numunenin yüksek sonuç verme sebebi, 3d yazıcı ile gerçekleştirilen üretimin yüksek çözünürlükte olmamasıdır.



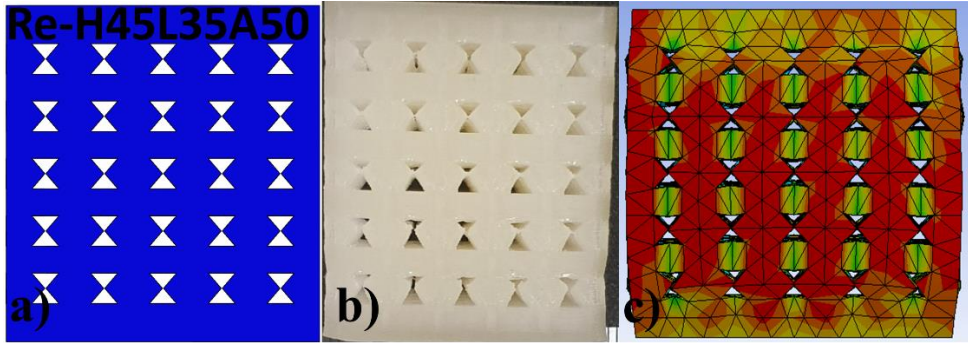
Resim 5.10. En yüksek negatif Poisson oranına sahip Re-entrant şekil, Re-H40L50A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Re-entrant geometrili basma deney numunelerinin basma dayanımları, yapılan deneyler sonucunda ANSYS analizleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.9'da gösterilmektedir. En düşük ve en yüksek değerler incelendiğinde, numunelerin desteksiz olarak üretilmesi sonucunda oluşan poroziteler ve filament akmaları, basma numunelerinin basma dayanımını etkilemiştir.



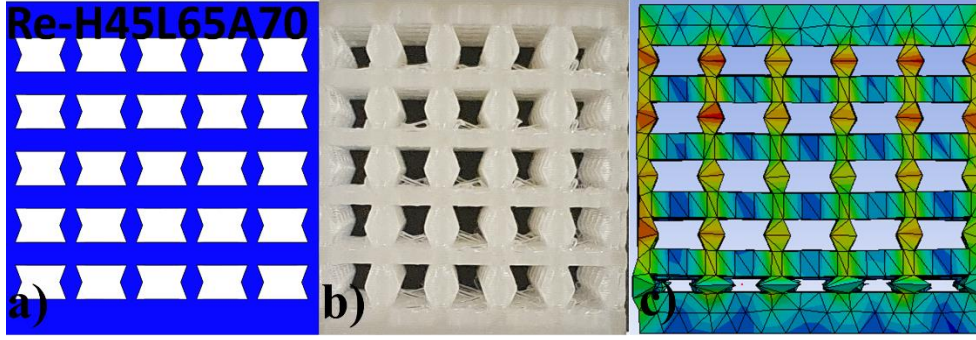
Şekil 5.9. Re-entrant geometrili ökzetik basma deney numunelerinin basma dayanımlarının deneysel ve sayısal sonuçları

En düşük ve en yüksek değerler incelendiğinde, iki dal arası açıdaki artışın üretilen numunelerdeki boşluk miktarını arttırdığı gözlemlenmektedir. Boşluk miktarı arttıkça numunelerin basma dayanımı azalmaktadır. Basma dayanımı en yüksek olan numune Resim 5.11’de gösterilmektedir.



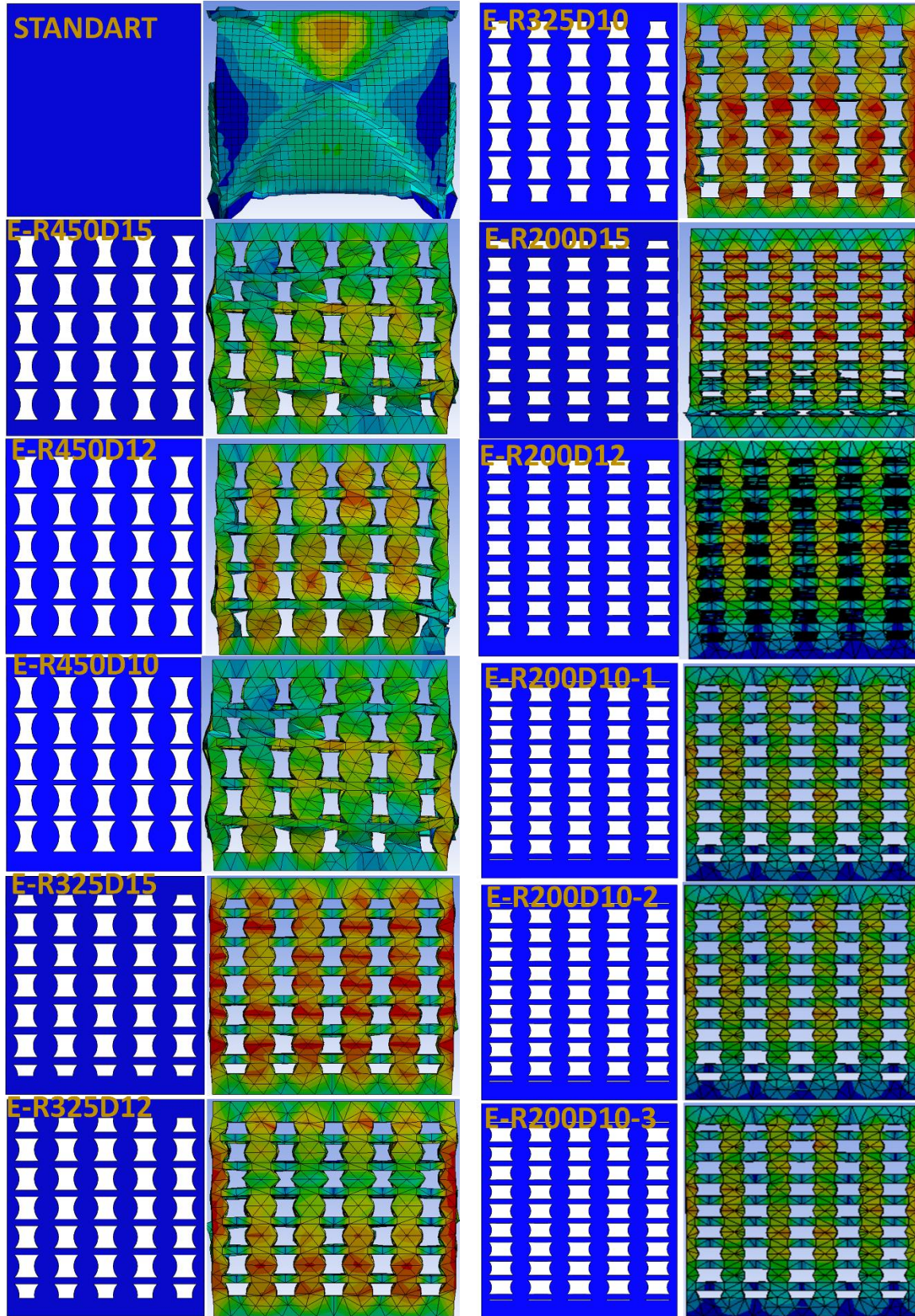
Resim 5.11. En yüksek basma dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L35A50: a) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Basma dayanımı en düşük olan numune Resim 5.12’de gösterilmektedir. Resim 5.12 incelendiğinde numune içerisindeki boşluk miktarının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu durum basma dayanımını etkilemiştir.



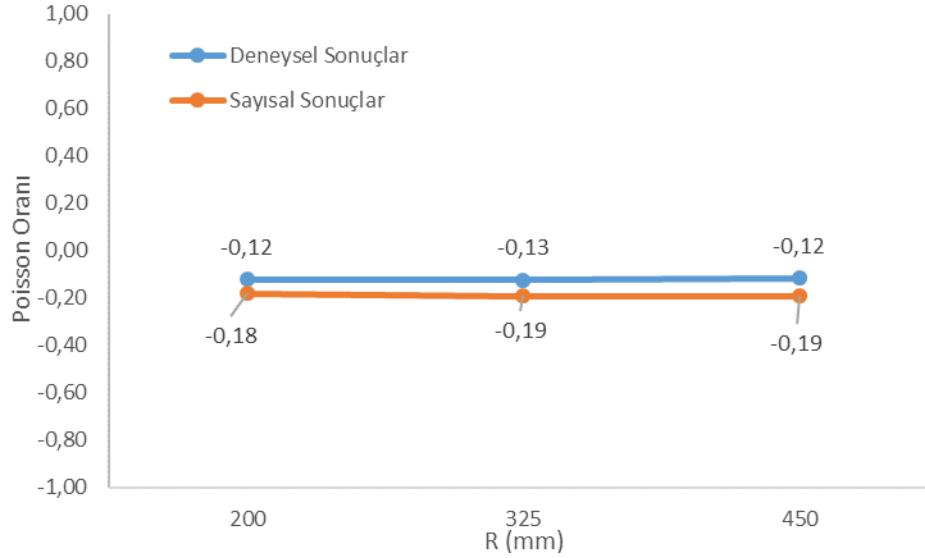
Resim 5.12. En düşük basma dayanımına sahip Re-entrant şekil, Re-H45L65A70: a) Re-entrant kafes geometrilili basma numunesi CAD çizimi; b) Re-entrant kafes geometrilili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Re-entrant kafes geometrilili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Eğri gözenek geometrilili 11 basma deney numunesinin 3d olarak SOLIDWORKS çizimleri ve ANSYS ortamında simülasyon olarak çekme deneylerine tabi tutulması gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 5.10’da gösterilmektedir.



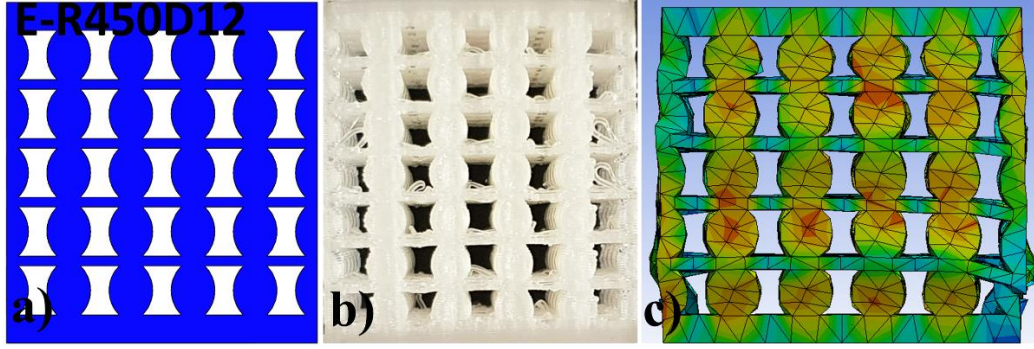
Şekil 5.10. Eğri şekilli basma deney numunelerinin sonlu elemanlar analizi sonuçları

Eğri geometrili basma deney numunelerinin Poisson oranları, yapılan deneyler sonucunda ANSYS analizleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.11’de gösterilmektedir. En düşük ve en yüksek değerler incelendiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar benzer niteliktedir. Basma numunelerindeki R ve D değişkenlerinin Poisson oranına etkisi gözlemlenmemiştir.



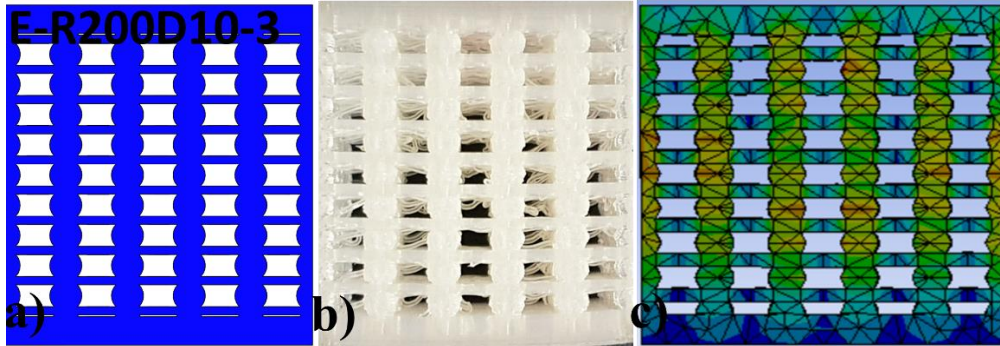
Şekil 5.11. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin Poisson oranlarının deneysel ve sayısal sonuçları

Eğri geometrili basma numunelerinden en düşük negatif Poisson oranı içeren E-R450D12 numunesi Resim 5.13’te gösterilmektedir. Bu numunenin negatif Poisson oranı değerinin yüksekliği çekme numunelerinde de görüldüğü gibi eğri yarıçapından kaynaklanan içbükeyliktir.



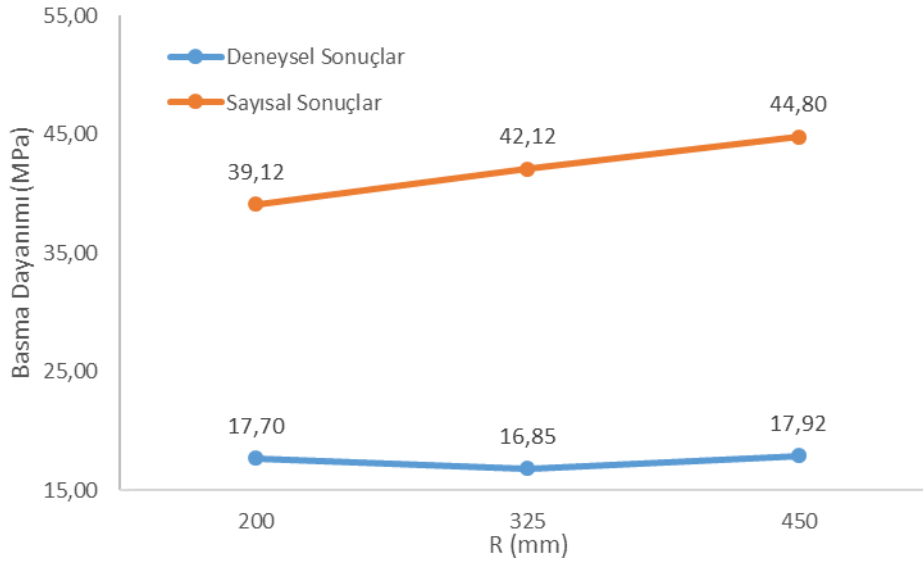
Resim 5.13. En düşük negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R450D12: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Eğri geometrili basma numunelerinden en yüksek Poisson oranı sonucu veren E-R200D10-3 numunesi Resim 5.14'te gösterilmektedir. Bunun sebebi eğri yarıçapının içbükeylik oluşturamamasıdır. Buna ilaveten Resim 5.14'te görüldüğü gibi, tasarlanan geometrideki istenilen eğriliğe üretilen geometride tam çözünürlükte ulaşılamamıştır. 3d yazıcı kalitesinden kaynaklanan bu problem, deney sonuçlarını olumsuz etkilemiştir.



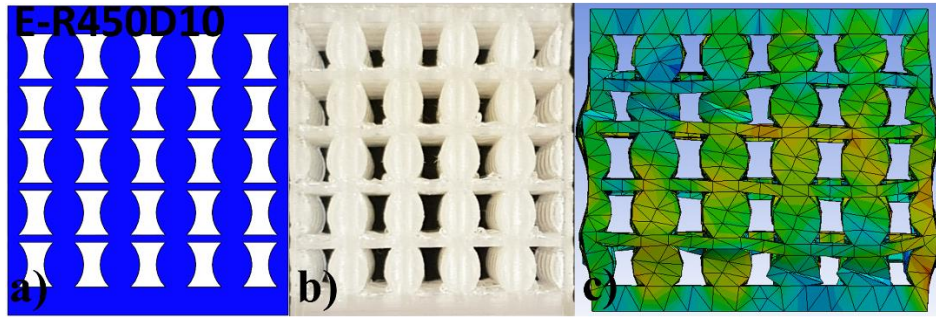
Resim 5.14. En yüksek negatif Poisson oranına sahip Eğri şekil, E-R200D10-3: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

Eğri geometrili basma deney numunelerinin basma dayanımları, yapılan deneyler sonucunda ANSYS analizleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.12'de gösterilmektedir.



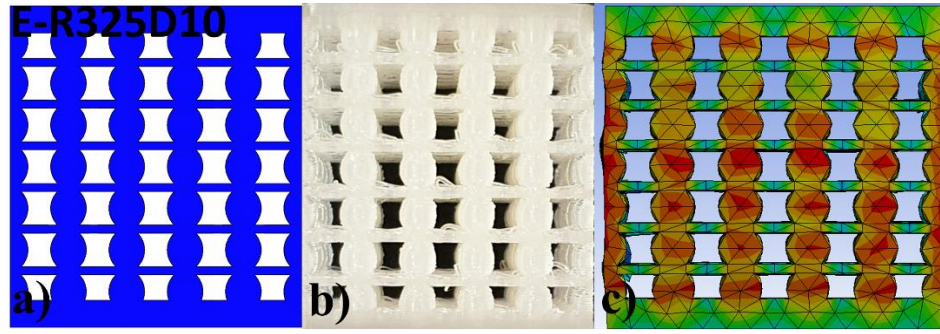
Şekil 5.12. Eğri geometrili ökzetik basma deney numunelerinin basma dayanımlarının deneysel ve sayısal sonuçları

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yarıçap değişiminin basma dayanımına yeterli düzeyde etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç SPSS analizi ile örtüşmektedir. En yüksek basma dayanımına sahip Eğri geometri Resim 5.15'te gösterilmektedir.



Resim 5.15. En yüksek basma dayanımına sahip Eğri şekil, E-R450D10: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

En yüksek basma dayanımına sahip Eğri geometri Resim 5.16'da gösterilmektedir. Buna göre basma numunesi içerisindeki eğri geometri miktarının fazla olması ve bundan dolayı numune içerisindeki boşluk hacmi miktarı, Eğri geometrinin basma dayanımını etkilemiştir.



Resim 5.16. En düşük basma dayanımına sahip Eğri şekil, E-R325D10: a) Eğri kafes geometrili basma numunesi CAD çizimi; b) Eğri kafes geometrili basma numunesi 3d yazıcıda üretilmiş form; c) Eğri kafes geometrili basma numunesi sonlu eleman analizi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, PLA'ya h-BN tozu katkılandırılarak kompozit malzeme üretilmiş ve PLA' nın mekanik özellikleri arttırılmıştır. Üretilen bu yeni kompozit malzeme, filament haline getirilerek FDM yönteminde kullanılmıştır. Sonuçlar kütlece %1 h-BN katkısının PLA'nın mikrosertliğini arttırdığını göstermektedir. Ek olarak bu tez çalışmasında, kafes geometrili yapıların Poisson oranları incelenmiştir. Kafes geometriler, Re-entrant geometri olarak belirlenmiş ve Eğri geometri olarak yeni bir kafes yapı önerilmiştir. Bu yapılar, PLA'dan FDM yöntemi ile üretilmiş ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, re-entrant geometrinin ve önerilen eğri geometrinin negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir. Çekme dayanımı, basma dayanımı ve bu numunelerin Poisson oranları incelendiğinde, Re-entrant geometrili numunelerin çekme dayanımının Eğri geometriden %51 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, Re-entrant geometrili numunelerin basma dayanımının Eğri geometriden %22 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, Re-entrant geometrili numunelerin Poisson oranının Eğri geometriden %11 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, önerilen eğri geometri ökzetik koşulları sağlamasıyla birlikte Re-entrant geometriden daha düşük mekanik özellikler sergilemektedir.

Bu tez çalışmasında, PLA/h-BN kompozitlerin karışım hacimleri kısıtlı malzeme nedeniyle düşük tutulmuştur. Gelecek çalışmalarda katkılandırma yüzdesinde farklılıklar araştırılmalıdır. Kullanılan 3d yazıcının nozul çapının kısıtlı olması, polimer içerisindeki toz katkısını sınırlandırmaktadır. Yeni filament tasarımı için nozul çapında artışa gidilmelidir. Ayrıca, ökzetik numunelerin üretimi, tasarlanan geometrilerin oldukça karmaşık ve hassas geometride olması nedeniyle kalibrasyon ve çözünürlüğü yüksek bir 3d yazıcıda, düşük nozul çapında ve düşük hızlarda gerçekleştirilmelidir. Gelecek çalışmalarda, ökzetik yapılar için eğri geometri gibi farklı geometri tasarımlarına gidilebilir. Buna ilaveten, tasarlanan geometrilerin her bir parametresi (açı, kenar, kalınlık) sonlu elemanlar analizi yardımıyla detaylı olarak araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P., and Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284–297.
- Acharya, L., Babu, P., Behera, A., Pattnaik, S. P., and Parida, K. (2021). Novel synthesis of boron nitride nanosheets from hexagonal boron nitride by modified aqueous phase bi-thermal exfoliation method. *Materials Today: Proceedings*, 35, 239–242.
- Ai, L., and Gao, X. L. (2018). An analytical model for star-shaped re-entrant lattice structures with the orthotropic symmetry and negative Poisson's ratios. *International Journal of Mechanical Sciences*, 145, 158–170.
- Alam, F., Shukla, V. R., Varadarajan, K. M., and Kumar, S. (2020). Microarchitected 3D printed polylactic acid (PLA) nanocomposite scaffolds for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103, 103576.
- Alhijaj, M., Belton, P., and Qi, S. (2016). An investigation into the use of polymer blends to improve the printability of and regulate drug release from pharmaceutical solid dispersions prepared via fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 108, 111–125.
- Aliotta, L., Cinelli, P., Coltelli, M. B., and Lazzeri, A. (2019). Rigid filler toughening in PLA-calcium carbonate composites: Effect of particle surface treatment and matrix plasticization. *European Polymer Journal*, 113, 78–88.
- Alves, J. L., Rosa, P. de T. V. e., Realinho, V., Antunes, M., Velasco, J. I., and Morales, A. R. (2019). Influence of chemical composition of Brazilian organoclays on the morphological, structural and thermal properties of PLA-organoclay nanocomposites. *Applied Clay Science*, 180(1), 105186.
- Assidi, M., and Ganghoffer, J. F. (2012). Composites with auxetic inclusions showing both an auxetic behavior and enhancement of their mechanical properties. *Composite Structures*, 94(8), 2373–2382.
- Auricchio, F., Bacigalupo, A., Gambarotta, L., Lepidi, M., Morganti, S., and Vadalà, F. (2019). A novel layered topology of auxetic materials based on the tetrachiral honeycomb microstructure. *Materials and Design*, 179, 107883.
- Balla, V. K., Tadimeti, J. G. D., Kate, K. H., and Satyavolu, J. (2020). 3D printing of modified soybean hull fiber/polymer composites. *Materials Chemistry and Physics*, 254, 123452.
- Baran, T., and Öztürk, M. (2020). In-plane elasticity of a strengthened re-entrant honeycomb cell. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 83, 104037.

- Ben Ali, N., Khelif, M., Hammami, D., and Bradai, C. (2019). Mechanical and morphological characterization of spherical cell porous structures manufactured using FDM process. *Engineering Fracture Mechanics*, 216, 106527.
- Besharatloo, H., Gordon, S., Rodriguez-Suarez, T., Can, A., Oliver, W. C., Llanes, L., and Roa, J. J. (2019). Small-scale mechanical properties of constitutive phases within a polycrystalline cubic boron nitride composite. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(16), 5181–5189.
- Bhandari, S., Lopez-Anido, R. A., and Gardner, D. J. (2019). Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*, 30, 100922.
- Bi, H., Ye, G., Yang, H., Sun, H., Ren, Z., Guo, R., Xu, M., Cai, L., and Huang, Z. (2020). Near infrared-induced shape memory polymer composites with dopamine-modified multiwall carbon nanotubes via 3D-printing. *European Polymer Journal*, 136, 109920.
- Bindhu, B., Renisha, R., Roberts, L., and Varghese, T. O. (2018). Boron nitride reinforced polylactic acid composites film for packaging: Preparation and properties. *Polymer Testing*, 66, 172–177.
- Buj-Corral, I., Bagheri, A., Domínguez-Fernández, A., and Casado-López, R. (2020). Influence of infill and nozzle diameter on porosity of FDM printed parts with rectilinear grid pattern. *Procedia Manufacturing*, 41, 288–295.
- Büyüç, B., Goncu, Y., Tugrul, A. B., and Ay, N. (2020). Swelling on neutron induced hexagonal boron nitride and hexagonal boron nitride-titanium diboride composites. *Vacuum*, 177, 109350.
- Byrley, P., Geer Wallace, M. A., Boyes, W. K., and Rogers, K. (2020). Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. *Science of the Total Environment*, 736, 139604.
- Carlier, E., Marquette, S., Peerboom, C., Denis, L., Benali, S., Raquez, J. M., Amighi, K., and Goole, J. (2019). Investigation of the parameters used in fused deposition modeling of poly(lactic acid) to optimize 3D printing sessions. *International Journal of Pharmaceutics*, 565, 367–377.
- Carneiro, V. H., and Puga, H. (2018). Axisymmetric auxetics. *Composite Structures*, 204, 438–444.
- Carneiro, V. H., Puga, H., and Meireles, J. (2019). Positive, zero and negative Poisson's ratio non-stochastic metallic cellular solids: Dependence between static and dynamic mechanical properties. *Composite Structures*, 226, 111239.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., and Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143–157.

- Chai, W., Wei, Q., Yang, M., Ji, K., Guo, Y., Wei, S., and Wang, Y. (2020). The printability of three water based polymeric binders and their effects on the properties of 3D printed hydroxyapatite bone scaffold. *Ceramics International*, 46(5), 6663–6671.
- Chen, X., Moughames, J., Ji, Q., Martínez, J. A. I., Tan, H., Adrar, S., Laforge, N., Cote, J. M., Euphrasie, S., Ulliac, G., Kadic, M., and Laude, V. (2020). Optimal isotropic, reusable truss lattice material with near-zero Poisson's ratio. *Extreme Mechanics Letters*, 41, 101048.
- Choi, M. J., Kang, S. H., Oh, M. H., and Cho, S. (2019). Controllable optimal design of auxetic structures for extremal Poisson's ratio of -2 . *Composite Structures*, 226, 111215.
- Chong, Y. M., Zhang, W. J., Yang, Y., Ye, Q., Bello, I., and Lee, S. T. (2009). Deposition of cubic boron nitride films on diamond-coated WC:Co inserts. *Diamond and Related Materials*, 18(11), 1387–1392.
- Chuensangjun, C., Pechyen, C., and Sirisansaneeyakul, S. (2013). Degradation behaviors of different blends of polylactic acid buried in soil. *Energy Procedia*, 34, 73–82.
- Chun, L. M., and Kowalik, M. (2018). Preliminary studies for alternative lattice core design for FDM 3D Printed Sandwich Panels. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 26519–26525.
- Cisneros-López, E. O., Pal, A. K., Rodriguez, A. U., Wu, F., Misra, M., Mielewski, D. F., Kiziltas, A., and Mohanty, A. K. (2020). Recycled poly(lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*, 7–8, 100027.
- Cong, P. H., Long, P. T., Van Nhat, N., and Duc, N. D. (2019). Geometrically nonlinear dynamic response of eccentrically stiffened circular cylindrical shells with negative Poisson's ratio in auxetic honeycombs core layer. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152, 443–453.
- Corapi, D., Morettini, G., Pascoletti, G., and Zitelli, C. (2019). Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*, 24, 289–295.
- Cowley, A., Perrin, J., Meurisse, A., Micallef, A., Fateri, M., Rinaldo, L., Bamsey, N., and Sperl, M. (2019). Effects of variable gravity conditions on additive manufacture by fused filament fabrication using polylactic acid thermoplastic filament. *Additive Manufacturing*, 28, 814–820.
- Damanpack, A. R., Bodaghi, M., and Liao, W. H. (2019). Experimentally validated multi-scale modeling of 3D printed hyper-elastic lattices. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 108, 87–110.
- Dawoud, M., Taha, I., and Ebeid, S. J. (2016). Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 21, 39–45.

- Değerli, C., and El, S. N. (2017). Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojisi ile gıda üretimine genel bakış. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 5(6), 593-599.
- Dhinesh, S. K., Arun, P. S., Senthil, K. K. L., and Megalingam, A. (2020). Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 45(2), 1175-1180.
- Ding, S., Zou, B., Wang, P., and Ding, H. (2019). Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polymer Testing*, 78, 105948.
- Dong, Z., Li, Y., Zhao, T., Wu, W., Xiao, D., and Liang, J. (2019). Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb. *Materials and Design*, 182, 108036.
- Duan, S., Xi, L., Wen, W., and Fang, D. (2020). A novel design method for 3D positive and negative Poisson's ratio material based on tension-twist coupling effects. *Composite Structures*, 236, 111899.
- Durga Prasada Rao, V., Rajiv, P., and Navya Geethika, V. (2019). Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA. *Materials Today: Proceedings*, 18(6), 2012–2018.
- Eren, O., ve Sezer, H. K. (2019). *Lazer eklentili ergiyik biriktirme (FDM) yöntemiyle kompozit parça üretimi*. Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu. Ankara.
- Evlen, H. (2019). Doluluk Oranının 3B Yazıcıda Üretilen TPU ve TPE Numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik*, 21(63), 793–804.
- Ferrandez-Montero, A., Lieblich, M., Benavente, R., González-Carrasco, J. L., and Ferrari, B. (2020). New approach to improve polymer-Mg interface in biodegradable PLA/Mg composites through particle surface modification. *Surface and Coatings Technology*, 383, 125285.
- Francesconi, L., Baldi, A., Liang, X., Aymerich, F., and Taylor, M. (2019). Variable Poisson's ratio materials for globally stable static and dynamic compression resistance. *Extreme Mechanics Letters*, 26, 1–7.
- Fu, M. H., Chen, Y., and Hu, L. L. (2017). A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength. *Composite Structures*, 160, 574–585.
- Fu, M., Liu, F., and Hu, L. (2018). A novel category of 3D chiral material with negative Poisson's ratio. *Composites Science and Technology*, 160, 111–118.
- Furet, B., Poullain, P., and Garnier, S. (2019). 3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete. *Additive Manufacturing*, 28, 58–64.

- Gao, X., Yu, N., and Li, J. (2020a). Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive. *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*, 2, 303-330.
- Gao, Q., Liao, W. H., and Wang, L. (2020b). An analytical model of cylindrical double-arrowed honeycomb with negative Poisson's ratio. *International Journal of Mechanical Sciences*, 173, 105400.
- Gao, Q., Tan, C. A., Hulbert, G., and Wang, L. (2020c). Geometrically nonlinear mechanical properties of auxetic double-V microstructures with negative Poisson's ratio. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 80, 103933.
- Gao, Q., Wang, L., Zhou, Z., Ma, Z. D., Wang, C., and Wang, Y. (2018). Theoretical, numerical and experimental analysis of three-dimensional double-V honeycomb. *Materials and Design*, 139, 380–391.
- Gavali, V. C., Kubade, P. R., and Kulkarni, H. B. (2020). Property enhancement of carbon fiber reinforced polymer composites prepared by fused deposition modeling. *Materials Today: Proceedings*, 23, 221–229.
- Geng, P., Zhao, J., Wu, W., Ye, W., Wang, Y., Wang, S., and Zhang, S. (2019). Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 266–273.
- Ghaffari, S., Khalid, S., Butler, M., and Naguib, H. E. (2015). Development of high thermally conductive and electrically insulative polylactic acid (PLA) and hexagonal boron nitride (hBN) composites for electronic packaging applications. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 9(2), 145–154.
- Gorjan, L., Tonello, R., Sebastian, T., Colombo, P., and Clemens, F. (2019). Fused deposition modeling of mullite structures from a preceramic polymer and γ -alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(7), 2463–2471.
- Gregor-Svetec, D., Leskovšek, M., Vrabič Brodnjak, U., Stankovič Elesini, U., Muck, D., and Urbas, R. (2020). Characteristics of HDPE/cardboard dust 3D printable composite filaments. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 116379.
- Gu, P., and Li, L. (2002). Fabrication of biomedical prototypes with locally controlled properties using FDM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1), 181–184.
- Güngör, A., Akbay, I. K., and Özdemir, T. (2019). EPDM rubber with hexagonal boron nitride: A Thermal Neutron Shielding Composite. *Radiation Physics and Chemistry*, 165, 108391.
- Hamad, K., Kaseem, M., Deri, F., and Ko, Y. G. (2016). Mechanical properties and compatibility of polylactic acid/polystyrene polymer blend. *Materials Letters*, 164, 409–412.

- Hamzehei, R., Rezaei, S., Kadkhodapour, J., Anaraki, A. P., and Mahmoudi, A. (2020). 2D triangular anti-trichiral structures and auxetic stents with symmetric shrinkage behavior and high energy absorption. *Mechanics of Materials*, 142, 103291.
- Haneef, I. N. H. M., Buys, Y. F., Shaffiar, N. M., Shaharuddin, S. I. S., and Khairusshima, M. K. N. (2019). Miscibility, mechanical, and thermal properties of polylactic acid/polypropylene carbonate (PLA/PPC) blends prepared by meltmixing method. *Materials Today: Proceedings*, 17, 534–542.
- Hayoune, F., Chelouche, S., Trache, D., Zitouni, S., and Grohens, Y. (2020). Thermal decomposition kinetics and lifetime prediction of a PP/PLA blend supplemented with iron stearate during artificial aging. *Thermochimica Acta*, 690, 178700.
- He, C., Ma, C., Li, X., Yan, L., Hou, F., Liu, J., and Guo, A. (2020). Polymer-derived SiOC ceramic lattice with thick struts prepared by digital light processing. *Additive Manufacturing*, 35, 101366.
- Hossain, K. M. Z., Parsons, A. J., Rudd, C. D., Ahmed, I., and Thielemans, W. (2014). Mechanical, crystallisation and moisture absorption properties of melt drawn polylactic acid fibres. *European Polymer Journal*, 53(1), 270–281.
- Hou, X., Deng, Z., and Zhang, K. (2016). Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5), 490–501.
- Houaoui, A., Lyyra, I., Agniel, R., Pauthe, E., Massera, J., and Boissière, M. (2020). Dissolution, bioactivity and osteogenic properties of composites based on polymer and silicate or borosilicate bioactive glass. *Materials Science and Engineering C*, 107, 110340.
- Hu, C., Dong, J., Luo, J., Qin, Q. H., and Sun, G. (2020). 3D printing of chiral carbon fiber reinforced polylactic acid composites with negative Poisson's ratios. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108400.
- Hu, L. L., Luo, Z. R., and Yin, Q. Y. (2019a). Negative Poisson's ratio effect of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation. *Thin-Walled Structures*, 141, 283–292.
- Hu, L. L., Zhou, M. Z., and Deng, H. (2019b). Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation. *Composite Structures*, 207, 323–330.
- Hu, L. L., Luo, Z. R., Zhang, Z. Y., Lian, M. K., and Huang, L. S. (2019c). Mechanical property of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation. *Composites Part B: Engineering*, 163, 107–120.
- Huang, C., Xu, M., and Huai, X. (2019). Experimental investigation on thermodynamic and kinetic of calcium hydroxide dehydration with hexagonal boron nitride doping for thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Science*, 206, 518–526.
- Huang, H., Liu, W., and Liu, Z. (2020). An additive manufacturing-based approach for carbon fiber reinforced polymer recycling. *CIRP Annals*, 69(1), 33–36.

- Ilyés, K., Kovács, N. K., Balogh, A., Borbás, E., Farkas, B., Casian, T., Marosi, G., Tomuța, I., and Nagy, Z. K. (2019). The applicability of pharmaceutical polymeric blends for the fused deposition modelling (FDM) 3D technique: Material considerations–printability–process modulation, with consecutive effects on in vitro release, stability and degradation. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 129, 110–123.
- İnternet: Artıboyut. Url: <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/67-filamentlerin-detayli-karsilastirilmesi>. Son Erişim Tarihi: 15. 02. 2021
- İnternet: Boyutkat. Url: <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/petg-filament-nedir/#:~:text=PETG%2C%20temel%20PET%20formundan%20daha,4-silindirikloheksilenedimetilen%20tereftalat%20olarak%20bilinir>. Son Erişim Tarihi: 15. 02. 2021
- İnternet: Katkıdeposu. Url: <https://www.katkideposu.com/Polivinil-Pva,PR-3369.html>. Son Erişim Tarihi: 15. 02. 2021
- İnternet: Plastdepo. Url: <https://www.plastdepo.com.tr/>. Son Erişim Tarihi: 15. 02. 2021
- İnternet: Xiamen Keyuan Plastic Co., Ltd. Url: <http://tr.ky-plastics.com/search/pet.html>. Son Erişim Tarihi: 15. 02. 2021
- Jiang, Y., Rudra, B., Shim, J., and Li, Y. (2019). Limiting strain for auxeticity under large compressive Deformation: Chiral vs. re-entrant cellular solids. *International Journal of Solids and Structures*, 162, 87–95.
- Jiang, H., Ren, Y., Jin, Q., Zhu, G., Hu, Y., and Cheng, F. (2020). Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm. *Thin-Walled Structures*, 154, 106911.
- Jin, Y., Wan, Y., Zhang, B., and Liu, Z. (2017). Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 233–239.
- Jing, J., Chen, Y., Shi, S., Yang, L., and Lambin, P. (2020). Facile and scalable fabrication of highly thermal conductive polyethylene/graphene nanocomposites by combining solid-state shear milling and FDM 3D-printing aligning methods. *Chemical Engineering Journal*, 402, 126218.
- Karaman, E., ve Çolak, O. (2019). Eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(2), 90–99.
- Karamooz Ravari, M. R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., and Rezaei, R. (2014). Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154–161.

- Khabia, S., and Jain, K. K. (2019). Influence of change in layer thickness on mechanical properties of components 3D printed on Zortrax M 200 FDM printer with Z-ABS filament material & Accucraft i250+ FDM printer with low cost ABS filament material. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1315–1322.
- Kodal, M., Wis, A. A., and Ozkoc, G. (2018). The mechanical, thermal and morphological properties of γ -irradiated PLA/TAIC and PLA/OvPOSS. *Radiation Physics and Chemistry*, 153, 214–225.
- Koeppel, A., Hernandez Padilla, C. A., Voshage, M., Schleifenbaum, J. H., and Markert, B. (2018). Efficient numerical modeling of 3D-printed lattice-cell structures using neural networks. *Manufacturing Letters*, 15, 147–150.
- Kolken, H. M. A., Lietaert, K., van der Sloten, T., Pouran, B., Meynen, A., Van Loock, G., Weinans, H., Scheys, L., and Zadpoor, A. A. (2020). Mechanical performance of auxetic meta-biomaterials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 104, 103658.
- Köllner, A., Todt, M., Ganzosch, G., and Völlmecke, C. (2019). Experimental and numerical investigation on pre-stressed lattice structures. *Thin-Walled Structures*, 145, 106396.
- Kumar, A., Venkatappa Rao, T., Ray Chowdhury, S., and Ramana Reddy, S. V. S. (2017). Compatibility confirmation and refinement of thermal and mechanical properties of poly (lactic acid)/poly (ethylene-co-glycidyl methacrylate) blend reinforced by hexagonal boron nitride. *Reactive and Functional Polymers*, 117, 1–9.
- Kumar, A., Venkatappa Rao, T., Ray Chowdhury, S., and Ramana Reddy, S. V. S. (2018). Optimization of mechanical, thermal and hydrolytic degradation properties of Poly (lactic acid)/Poly (ethylene-co-glycidyl methacrylate)/Hexagonal boron nitride blend-composites through electron-beam irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 428, 38–46.
- Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., and Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341.
- Lee, C. Y., and Liu, C. Y. (2019). The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 25, 196–203.
- Li, X., Lu, Z., Yang, Z., and Yang, C. (2017). Directions dependence of the elastic properties of a 3D augmented re-entrant cellular structure. *Materials and Design*, 134, 151–162.
- Li, T., Chen, Y., Hu, X., Li, Y., and Wang, L. (2018). Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials and Design*, 142, 247–258.

- Li, X., Gao, L., Zhou, W., Wang, Y., and Lu, Y. (2019). Novel 2D metamaterials with negative Poisson's ratio and negative thermal expansion. *Extreme Mechanics Letters*, 30, 100498.
- Liu, W., Wu, N., and Pochiraju, K. (2018). Shape recovery characteristics of SiC/C/PLA composite filaments and 3D printed parts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 108, 1–11.
- Liu, Z., Lei, Q., and Xing, S. (2019). Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3743–3753.
- Lubombo, C., and Huneault, M. A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214–228.
- Lule, Z., and Kim, J. (2019). Thermally conductive and highly rigid polylactic acid (PLA) hybrid composite filled with surface treated alumina/nano-sized aluminum nitride. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 124, 105506.
- Luo, Y., Lin, Z., and Guo, G. (2019). Biodegradation Assessment of Poly (Lactic Acid) Filled with Functionalized Titania Nanoparticles (PLA/TiO₂) under Compost Conditions. *Nanoscale Research Letters*, 14, 11671.
- Ma, C., Lei, H., Liang, J., Wu, W., Wang, T., and Fang, D. (2018). Macroscopic mechanical response of chiral-type cylindrical metastructures under axial compression loading. *Materials and Design*, 158, 198–212.
- Macedo, J., Samaro, A., Vanhoorne, V., Vervaet, C., and Pinto, J. F. (2020). Processability of poly(vinyl alcohol) based filaments with paracetamol prepared by hot-melt extrusion for additive manufacturing. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(12), 3636–3644.
- Magar, S., Khedkar, N. K., and Kumar, S. (2018). Review of the effect of built orientation on mechanical Properties of metal-plastic composite parts fabricated by Additive Manufacturing Technique. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3926–3935.
- Maharjan, N., Joshi, P., Rai, R. C., and Nakarmi, M. L. (2021). Atomic-like emissions in UV region from hexagonal boron nitride crystal powders. *Journal of Luminescence*, 234, 117944.
- Mahbod, M., and Asgari, M. (2019). Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models. *International Journal of Mechanical Sciences*, 155, 248–266.
- Mallick, S., Ahmad, Z., Touati, F., Bhadra, J., Shakoar, R. A., and Al-Thani, N. J. (2018). PLA-TiO₂ nanocomposites: Thermal, morphological, structural, and humidity sensing properties. *Ceramics International*, 44(14), 16507–16513.

- Matta, A. K., Prasad Kodali, S., Ivvala, J., and Kumar, P. J. (2018). Metal prototyping the future of automobile industry: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 17597–17601.
- McCaw, J. C. S., and Cuan-Urquizo, E. (2018). Curved-layered additive manufacturing of non-planar, parametric lattice structures. *Materials and Design*, 160, 949–963.
- Melocchi, A., Parietti, F., Maroni, A., Foppoli, A., Gazzaniga, A., and Zema, L. (2016). Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 509(1–2), 255–263.
- Mohd Pu'ad, N. A. S., Abdul Haq, R. H., Mohd Noh, H., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., and Lee, T. C. (2020). Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications. *Materials Today: Proceedings*, 29, 228–232.
- Montjovent, M. O., Mark, S., Mathieu, L., Scaletta, C., Scherberich, A., Delabarde, C., Zambelli, P. Y., Bourban, P. E., Applegate, L. A., and Pioletti, D. P. (2008). Human fetal bone cells associated with ceramic reinforced PLA scaffolds for tissue engineering. *Bone*, 42(3), 554–564.
- Muta, S., Ikeda, M., Nikaido, T., Sayed, M., Sadr, A., Suzuki, T., and Tagami, J. (2020). Chairside fabrication of provisional crowns on FDM 3D-printed PVA model. *Journal of Prosthodontic Research*, 64(4), 401–407.
- Najmon, J. C., Raeisi, S., and Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. 7-31.
- Nečemer, B., Glodež, S., Novak, N., and Kramberger, J. (2020). Numerical modelling of a chiral auxetic cellular structure under multiaxial loading conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 3–9.
- Novak, N., Vesenjaj, M., Tanaka, S., Hokamoto, K., and Ren, Z. (2020). Compressive behaviour of chiral auxetic cellular structures at different strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 141, 103566.
- Nunes, J. P., and Silva, J. F. (2016). Sandwiched composites in aerospace engineering. In *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. 129-174.
- Öz, M. (2016). Hegzagonal bor nitrürün açık atmosferde termal davranışları. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 37(1), 57-64.
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications* 3, 1, 9–14.

- Özsoy, K., ve Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36–48.
- Pai, A. J., Sarojini, B. K., Harshitha, K. R., Shivarama Holla, B., and Lobo, A. G. (2019). Spectral, morphological and optical studies on bischalcone doped polylactic acid (PLA) thin films as luminescent and UV radiation blocking materials. *Optical Materials*, 90, 145–151.
- Palmero, E. M., Casaleiz, D., de Vicente, J., Skårman, B., Vidarsson, H., Larsson, P. O., and Bollero, A. (2020). Effect of particle size distribution on obtaining novel MnAlC-based permanent magnet composites and flexible filaments for 3D-printing. *Additive Manufacturing*, 33, 101179.
- Park, S. J., Lee, J., Choi, J. W., Yang, J. H., Lee, J. H., Lee, J., Son, Y., Ha, C. W., Lee, N. K., Kim, S. H., and Park, S. H. (2021). Additive manufacturing of the core template for the fabrication of an artificial blood vessel: the relationship between the extruded deposition diameter and the filament/nozzle transition ratio. *Materials Science and Engineering C*, 118, 111406.
- Peng, X. L., Soyarslan, C., and Bargmann, S. (2020). Phase contrast mediated switch of auxetic mechanism in composites of infilled re-entrant honeycomb microstructures. *Extreme Mechanics Letters*, 35, 100641.
- Prasad, A., Mohan Bhasney, S., Sankar, M. R., and Katiyar, V. (2017). Fish scale derived hydroxyapatite reinforced poly (Lactic acid) polymeric bio-films: Possibilities for sealing/locking the internal fixation devices. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1340–1349.
- Quan, C., Han, B., Hou, Z., Zhang, Q., Tian, X., and Lu, T. J. (2020). 3D printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures. *Composites Part B: Engineering*, 187, 107858.
- Ranjan, N., Singh, R., and Ahuja, I. S. (2020). Development of HAp reinforced biodegradable porous structure through polymer deposition technology for tissue engineering applications. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 1, 196-215.
- Risyon, N. P., Othman, S. H., Basha, R. K., and Talib, R. A. (2020). Characterization of polylactic acid/halloysite nanotubes bionanocomposite films for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 23, 100450.
- Ryder, M. A., Lados, D. A., Iannacchione, G. S., and Peterson, A. M. (2018). Fabrication and properties of novel polymer-metal composites using fused deposition modeling. *Composites Science and Technology*, 158, 43–50.
- Sahmani, S., Khandan, A., Esmaeili, S., Saber-Samandari, S., Ghadiri Nejad, M., and Aghdam, M. M. (2020). Calcium phosphate-PLA scaffolds fabricated by fused deposition modeling technique for bone tissue applications: Fabrication, characterization and simulation. *Ceramics International*, 46(2), 2447–2456.

- Salahuddin, N., Abdelwahab, M., Gaber, M., and Elneanaey, S. (2020). Synthesis and design of norfloxacin drug delivery system based on PLA/TiO₂ nanocomposites: Antibacterial and antitumor activities. *Materials Science and Engineering C*, 108, 110337.
- Salim, M. A., Termiti, Z. H., and Saad, A. M. (2019). Mechanical properties on ABS/PLA materials for geospatial imaging printed product using 3D printer technology. *Materials Science and Materials Engineering*, 1-19.
- Saviano, M., Aquino, R. P., Del Gaudio, P., Sansone, F., and Russo, P. (2019). Poly(vinyl alcohol) 3D printed tablets: The effect of polymer particle size on drug loading and process efficiency. *International Journal of Pharmaceutics*, 561, 1–8.
- Sezer, H. K., and Eren, O. (2019). FDM 3D printing of MWCNT re-inforced ABS nanocomposite parts with enhanced mechanical and electrical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 339–347.
- Sezer, H. K., Eren, O., ve Börklü, H. R. (2016). *Karbon fiber takviyeli ABS filament üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. 1. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu. İstanbul.
- Sezer, H. K., Eren, O., ve Börklü, H. R. (2017). *Ergiyik biriktirme yöntemi ile karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin eklemeli imalatı: işlem parametrelerinin çekme özelliklerine etkisi*. 2nd International Symposium on 3D Printing Technologies. İstanbul.
- Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., ve Özdemir, V. (2018). Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 663-674.
- Sharma, R., Singh, R., Penna, R., and Fraternali, F. (2018). Investigations for mechanical properties of HAP, PVC and PP based 3D porous structures obtained through biocompatible FDM filaments. *Composites Part B: Engineering*, 132, 237–243.
- Shi, Z., Li, Q., Jiang, R., Zhang, C., Yin, W., Wu, T., and Xie, X. (2019). Influence of oxygen on the synthesis of large area hexagonal boron nitride on Fe₂B substrate. *Materials Letters*, 247, 52–55.
- Simpson, J., and Kazancı, Z. (2020). Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices. *Thin-Walled Structures*, 150, 106676.
- Singh, D., Singh, R., and Boparai, K. S. (2018). Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 80–95.
- Singh, R., and Kumar, R. (2020). Energy storage device from polymeric waste based nanocomposite by 3D printing. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 4, 425-432.

- Siriprom, W., Sangwaranatee, N., Herman, Chantarasunthon, K., Teanchai, K., and Chamchoi, N. (2018). Characterization and analyzation of the poly (L-lactic acid) (PLA) films. *Materials Today: Proceedings*, 5(7), 14803–14806.
- Srinivasan, R., Suresh Babu, B., Udhaya Rani, V., Suganthi, M., and Dheenasagar, R. (2020). Comparision of tribological behaviour for parts fabricated through fused deposition modelling (FDM) process on abs and 20% carbon fibre PLA. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1780–1786.
- Sun, J., Niu, B., Ren, L., Zhang, J., Lei, L., and Zhang, F. (2020). Densification and mechanical properties of boron carbide prepared via spark plasma sintering with cubic boron nitride as an additive. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(4), 1103–1110.
- Tagami, T., Hayashi, N., Sakai, N., and Ozeki, T. (2019). 3D printing of unique water-soluble polymer-based suppository shell for controlled drug release. *International Journal of Pharmaceutics*, 568, 118494.
- Tan, H. L., He, Z. C., Li, K. X., Li, E., Cheng, A. G., and Xu, B. (2019). In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio. *Composite Structures*, 229, 111415.
- Tiwary, V. K., Arunkumar, P., and Kulkarni, P. M. (2020). Micro-particle grafted eco-friendly polymer filaments for 3D printing technology. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1980–1984.
- Torres, A., Ilabaca, E., Rojas, A., Rodríguez, F., Galotto, M. J., Guarda, A., Villegas, C., and Romero, J. (2017). Effect of processing conditions on the physical, chemical and transport properties of polylactic acid films containing thymol incorporated by supercritical impregnation. *European Polymer Journal*, 89, 195–210.
- Tymrak, B. M., Kreiger, M., and Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, 58, 242–246.
- Valerga Puerta, A. P., Sanchez, D. M., Batista, M., and Salguero, J. (2018). Criteria selection for a comparative study of functional performance of fused deposition modelling and vacuum casting processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 721–727.
- Venkatesh, C., Fuenmayor, E., Doran, P., Major, I., Lyons, J. G., and Devine, D. M. (2019). Additive manufacturing of PLA/HNT nanocomposites for biomedical applications. *Procedia Manufacturing*, 38, 17–24.
- Vishnu Chandar, J., Mutharasu, D., Mohamed, K., Marsilla, K. I. K., Shanmugan, S., and Azlan, A. A. (2020). Melt compounded polylactic acid-hexagonal boron nitride-aluminum oxide hybrid composites for electronic applications: impact of hybrid fillers on thermophysical, dielectric, optical, and hardness properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(2), 147–164.

- Wajahat, M., Kim, J. H., Ahn, J., Lee, S., Bae, J., Pyo, J., and Seol, S. K. (2020). 3D printing of Fe₃O₄ functionalized graphene-polymer (FGP) composite microarchitectures. *Carbon*, 167, 278–284.
- Wang, K., Chang, Y. H., Chen, Y. W., Zhang, C., and Wang, B. (2015b). Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing. *Materials and Design*, 67, 159–164.
- Wang, X., Su, H., Jia, Y., and Li, P. (2015a). Integrated analysis on cure-microstructure-property-deformation correlation of carbon fiber reinforced resin composites. *Computational Materials Science*, 109, 7–13.
- Wang, F. (2018). Systematic design of 3D auxetic lattice materials with programmable Poisson's ratio for finite strains. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 114, 303–318.
- Wang, P., Zou, B., Ding, S., Li, L., and Huang, C. (2020a). Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, in Press, 1–11.
- Wang, S., Ding, Y., Yu, F., Zheng, Z., and Wang, Y. (2020b). Crushing behavior and deformation mechanism of additively manufactured Voronoi-based random open-cell polymer foams. *Materials Today Communications*, 25, 101406.
- Wang, Z., Xu, J., Lu, Y., Hu, L., Fan, Y., Ma, J., and Zhou, X. (2017a). Preparation of 3D printable micro/nanocellulose-poly(lactic acid) (MNC/PLA) composite wire rods with high MNC constitution. *Industrial Crops and Products*, 109, 889–896.
- Wang, X. T., Wang, B., Li, X. W., and Ma, L. (2017b). Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 131–132, 396–407.
- Wang, X. T., Wang, B., Wen, Z. H., and Ma, L. (2018). Fabrication and mechanical properties of CFRP composite three-dimensional double-arrow-head auxetic structures. *Composites Science and Technology*, 164, 92–102.
- Wei, X., Liu, Y., Zhao, D., and Ge, S. S. (2020a). 3D printing of piezoelectric barium titanate with high density from milled powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(15), 5423–5430.
- Wei, L., Zhao, X., Yu, Q., and Zhu, G. (2020b). A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength. *Thin-Walled Structures*, 149, 106623.
- Wu, D., Spanou, A., Diez-Escudero, A., and Persson, C. (2020). 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: A feasibility study using fused deposition modeling. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103, 103608.
- Wu, W., Song, X., Liang, J., Xia, R., Qian, G., and Fang, D. (2018). Mechanical properties of anti-tetrachiral auxetic stents. *Composite Structures*, 185, 381–392.

- Wu, X. (2018). Theoretical investigation of the effect of hexagonal boron nitride on perfect absorption in infrared regime. *Optics Communications*, 425, 172–175.
- Wu, Y., and Yang, L. (2020). The effect of unit cell size and topology on tensile failure behavior of 2D lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 170, 105342.
- Xiang, S., Feng, L., Bian, X., Li, G., and Chen, X. (2020). Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA. *Polymer Testing*, 81, 106211.
- Xiao, D., Dong, Z., Li, Y., Wu, W., and Fang, D. (2019). Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: Experiment and finite element analysis. *Materials Science and Engineering A*, 758, 163–171.
- Xiong, J., Di, J., Zhu, W., and Li, H. (2020). Hexagonal boron nitride adsorbent: Synthesis, performance tailoring and applications. *Journal of Energy Chemistry*, 40, 99–111.
- Xu, Y., Zhang, H., Šavija, B., Chaves Figueiredo, S., and Schlangen, E. (2019). Deformation and fracture of 3D printed disordered lattice materials: Experiments and modeling. *Materials and Design*, 162, 143–153.
- Xue, Y., and Han, F. (2019). Compressive mechanical property of a new three-dimensional aluminum based double-V lattice structure. *Materials Letters*, 254, 99–102.
- Xue, Y., Wang, W., and Han, F. (2019). Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers. *Composites Part B: Engineering*, 171, 183–191.
- Xue, Y., Wang, X., Wang, W., Zhong, X., and Han, F. (2018). Compressive property of Al-based auxetic lattice structures fabricated by 3-D printing combined with investment casting. *Materials Science and Engineering A*, 722, 255–262.
- Yadav, D. K., Srivastava, R., & Dev, S. (2019). Design and fabrication of ABS part by FDM for automobile application. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2089–2093.
- Yang, H., and Ma, L. (2018). Multi-stable mechanical metamaterials with shape-reconfiguration and zero Poisson's ratio. *Materials and Design*, 152, 181–190.
- Yang, H., and Ma, L. (2020). Design and characterization of axisymmetric auxetic metamaterials. *Composite Structures*, 249.
- Yang, L., Li, S., Zhou, X., Liu, J., Li, Y., Yang, M., Yuan, Q., and Zhang, W. (2019a). Effects of carbon nanotube on the thermal, mechanical, and electrical properties of PLA/CNT printed parts in the FDM process. *Synthetic Metals*, 253, 122–130.
- Yang, H., Wang, B., and Ma, L. (2019b). Designing hierarchical metamaterials by topology analysis with tailored Poisson's ratio and Young's modulus. *Composite Structures*, 214, 359–378.

- Yang, H., Wang, B., and Ma, L. (2019c). Mechanical properties of 3D double-U auxetic structures. *International Journal of Solids and Structures*, 180–181, 13–29.
- Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., and Li, S. (2019). A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*, 163, 393–402.
- Yao, Y., Wang, L., Li, J., Tian, S., Zhang, M., and Fan, Y. (2020). A novel auxetic structure based bone screw design: Tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation. *Materials and Design*, 188, 108424.
- Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., and Hermenean, K. (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials and Design*, 160, 179–193.
- Ye, G., Bi, H., and Hu, Y. (2020). Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures. *Composite Structures*, 233, 111706.
- Yin, X., Kou, Z., Wang, Z., Liu, T., Liang, A., Yang, M., Guan, S., Zhang, Y., Chen, S. J., Jiang, M., and He, D. (2020). Micro-sized polycrystalline cubic boron nitride with properties comparable to nanocrystalline counterparts. *Ceramics International*, 46(7), 8806–8810.
- Yola, M. L., and Atar, N. (2019). Simultaneous determination of β -agonists on hexagonal boron nitride nanosheets/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite modified glassy carbon electrode. *Materials Science and Engineering C*, 96, 669–676.
- Yu, B., Zhao, Z., Fu, S., Meng, L., Liu, Y., Chen, F., Wang, K., and Fu, Q. (2019a). Fabrication of PLA/CNC/CNT conductive composites for high electromagnetic interference shielding based on Pickering emulsions method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105558.
- Yu, S., Hwang, Y. H., Hwang, J. Y., and Hong, S. H. (2019b). Analytical study on the 3D-printed structure and mechanical properties of basalt fiber-reinforced PLA composites using X-ray microscopy. *Composites Science and Technology*, 175, 18–27.
- Zhai, J., Li, Y., Zhao, L., Chen, J., Song, C., and Meng, F. (2019). Exploring the effects of boron nitride coating on the thermal stability and photoluminescence properties of molybdenum disulfide nanospheres. *Ceramics International*, 45(17), 23694–23700.
- Zhang, H., and Zhang, B. (2018). Fast crack kinking manipulated by atomic hoop stress in monolayer hexagonal boron nitride strip. *Computational Materials Science*, 154, 1–7.
- Zhang, J., Lu, G., Ruan, D., and Wang, Z. (2018). Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 136, 143–154.

- Zhang, X., Fan, W., and Liu, T. (2020a). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 21, 100413.
- Zhang, L., Song, B., Liu, R., Zhao, A., Zhang, J., Zhuo, L., Tang, G., and Shi, Y. (2020b). Effects of structural parameters on the Poisson's ratio and compressive modulus of 2D pentamode structures fabricated by selective laser melting. *Engineering*, 6(1), 56–67.
- Zhao, W., Zhao, W., Huang, Z., Liu, G., and Wu, B. (2019). Tribological performances of epoxy resin composite coatings using hexagonal boron nitride and cubic boron nitride nanoparticles as additives. *Chemical Physics Letters*, 732, 136646.
- Zhao, W., Zhu, J., Liu, L., Leng, J., and Liu, Y. (2021). Analysis of small-scale topology and macroscale mechanical properties of shape memory chiral-lattice metamaterials. *Composite Structures*, 262, 113569.
- Zheng, M., Zhang, S., Chen, Y., Wu, Q., Li, Q., and Wang, S. (2020). Structure evolution of bio-based PLA/ENR thermoplastic vulcanizates during dynamic vulcanization processing. *Polymer Testing*, 82, 106324.
- Zhou, X., Deng, J., Fang, C., Lei, W., Song, Y., Zhang, Z., Huang, Z., and Li, Y. (2021). Additive manufacturing of CNTs/PLA composites and the correlation between microstructure and functional properties. *Journal of Materials Science and Technology*, 60, 27–34.



GAZİ GELECEKTİR...