T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OKSETİK (AUXETIC) KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre DEMİR

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2024

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OKSETİK (AUXETIC) KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre DEMİR

(21420591020)

ORCID: 0000-0002-4079-4218

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe BEDELOĞLU

ORCID: 0000-0003-2960-5188

TEMMUZ 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 21420591020 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emre DEMİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "OKSETİK (AUXETIC) KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Adı SOYADI** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Adı SOYADI** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Adı SOYADI …….. Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 8 Temmuz 2024

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Emre DEMİR

İmzası:

Aileme, sevdiceğime ve dostlarıma…

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında PLA gibi yenilikçi malzeme kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle oksetik ve oksetik olmayan çekirdek yapılar imal edilerek sandviç kompozit üretimi hedeflenmiştir.

Yüksek lisans tez sürecinde iş hayatım ile paralel şekilde yürütmeme imkan tanıyan ve destekleyen Baykar Teknoloji'ye teşekkür ederim.

Lisans eğitimim dahil olmak üzere lisansüstü eğitimimde de hem gündelik hayatta, hem de çalışması boyunca birikimini, değerli vaktini, desteklerini hiçbir zaman esirgememiş ve her zaman bilime teşvik eden değerli tez danışmanı hocam Prof. Dr. Ayşe BEDELOĞLU' na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca inandığım her şey için bana kefil olan ve destek olmaktan vazgeçmeyen kıymetli aileme bana olan desteklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2024

Emre DEMİR
(Kompozit İmalat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **x**
SEMBOLLER ..... **xii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvi**
SUMMARY ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Kompozit Malzemeler 2
1.1.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 5
1.1.1.1 Metal matrisli kompozitler (MMK) 5
1.1.1.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK) 6
1.1.1.3 Polimer matrisli kompozitler (PMK) 6
1.1.2 Matris malzemeleri 7
1.1.2.1 Termoplastik malzemeler 7
1.1.2.2 Termoset malzemeler 8
1.1.2.3 Elastomerler 9
1.2 Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojileri 10
1.2.1 Stereolitografi (Stereolithography) (SLA) 12
1.2.2 Eriyik biriktirme modellemesi (Fused deposition modeling) (FDM) 13
1.2.3 Seçici lazer sinterleme (Selective laser sintering) (SLS) 15
1.2.4 Lamine nesne imalatı (Laminated object manufacturing) (LOM) 16
1.2.5 Dijital ışık işleme (Digital light processing) (DLP) 17
1.2.6 3B Yazıcıların uygulama alanlarına kazandırdıkları 17
1.3 FDM'de Kullanılan Polimerler 20
1.4 Oksetik (Auxetic) Malzemeler 24
1.4.1 Sinklastik davranış 27
1.4.2 Değişken geçirgenlik 27
1.4.3 Kesme modülü 28
1.4.4 Girinti modülü ve enerji absorbe etme 28
1.4.5 Kırılma tokluğu 28
1.5 Literatür Araştırması 28
2. MALZEME VE YÖNTEM **51**
2.1 Malzeme 51
2.2 Yöntem 53
2.2.1 Çekirdek yapı modellemesi 53
2.2.2 Çekirdek yapı numune üretimi 60
2.2.3 Sandviç kompozitlerin üretimi 62
2.3 Mekanik Testler 63

2.3.1 Çekme testi 63
2.3.2 Üç nokta eğme testi 64
2.3.3 Basma testi 66
2.3.4 Poisson oranının hesaplanması 68
2.4 Mekanik Özelliklerin Tespiti İçin Sonlu Elemanlar Analizi 69
3. BULGULAR 71
3.1 Basılmış PLA Plaka Testleri 71
3.1.1 Çekme testi 71
3.1.2 Üç nokta eğme testi 72
3.2 Sandviç Kompozitlerin Mekanik Testleri 72
3.2.1 Üç nokta eğme testi 72
3.2.2 Basma testi 74
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 78
KAYNAKLAR 80
ÖZGEÇMİŞ 90

KISALTMALAR

3B : 3 Boyut

Al : Alüminyum

ASA : Akrilonitril Stiren Akrilat

CAD : Bilgisayar Destekli Dizayn (Computer Aided Design)

CO_2 : Karbondioksit

Cu : Common Gateway Interface

DLP : Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing)

Eİ : Eklemeli İmalat

FDM : Kaynaşmış Biriktirme Modellemesi (Fused Deposition Modeling)

FE : Sonlu Elemanlar (Finite Element)

LOM : Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing)

M.Ö. : Milattan Önce

M.S. : Milattan Sonra

Mg : Magnzeyum

MKK : Metal Matrisli Kompozitler

NASA : Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)

Ni : Nikel

PC : Polikarbonat

PDLA : Poli(D- laktik asit)

PEEK : Polietereterketon

PEI : Polieterimid

PES : Polyester

PETG : Polietilen Tereftalat Glikol

PLA : Polilaktik asit

PLLA : Poli(L-laktik asit)

PMK : Polimer Matrisli Kompozitler

PPS : Polifenilen Sülfit

ROP : Halka Açma Polimerizasyonu (Ring Opening Polymerization)

SB-PLA : Stereo-Blok Kopolimerler

SLA **:** Stereolitografi (Stereolithography)

SLS **:** Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering)

SMK **:** Seramik Matrisli Kompozitler

STL **:** Standard Triangle Language

Tg **:** Camsı Geçiş Sıcaklığı

Ti **:** Titanyum

Tm **:** Erime Sıcaklığı

TPU **:** Termoplastik Poliüretan

UV **:** Ultraviyole

Zn **:** Çinko

SEMBOLLER

%	**:** Yüzde
ΔL	**:** Numune boyundaki değişim
°C	**:** Santigrat derece
µm	**:**Mikrometre
A_0	**:** Kesit alanı
E	**:** Elastikiyet modülü
g/m^2	**:** Gram/metrekare
GPa	**:** Gigapaskal
h	**:** Yükseklik
L	**:** Numune son boy
L_0	**:** Numune ilk boy
mm	**:** Milimetre
mm/dak	**:** Milimetre/dakika
MPa	**:** Megapaskal
N	**:** Newton
P	**:** Yük
t	**:** Zaman
$v_{1,2}$	**:** Poisson Oranı
ε	**:** Epsilon
σ	**:** Sigma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: 3B yazıcıların geleneksel üretime göre kazandırdığı özellikler **18**
Çizelge 1.2: Endüstride 3B teknolojinin kullanıldığı uygulamalar. **19**
Çizelge 1.3: Poli(laktik asit) (PLA) özellikleri **23**
Çizelge 1.4: Doğada yaygın kullanılan bazı malzemelerin Poisson oranları **25**
Çizelge 1.5: 3B baskılı peteklerin geometrik parametreleri (birim: mm) **29**
Çizelge 1.6: Takviye ve matris malzemesinin gerilim-gerinim değer çizelgesi **42**
Çizelge 1.7: Tasarlanan yapıların yüzey alanları **48**
Çizelge 2.1: Two Trees Bluer 3B yazıcı özellikleri. **51**
Çizelge 2.2: Kullanılan PLA malzemesinin özellikleri. **52**
Çizelge 2.3: Kullanılan karbon kumaş özellikleri. **53**
Çizelge 2.4: Kullanılan epoksi reçine özellikleri. **53**
Çizelge 2.5: Her modelin birim hücre boyutu. **56**
Çizelge 2.6: ASTM C365 önerilen minimum numune kesit alanı. **57**
Çizelge 2.7: PLA ile baskı alınan numunelerin üretim parametreleri. **61**
Çizelge 3.1: Sandviç yapıların üç nokta eğme testi değerleri. **74**
Çizelge 3.2: Sandviç yapıların basma testi değerleri. **76**
Çizelge 3.3: Farklı tasarıma sahip yapıların Poisson oranları. **77**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması **5**
Şekil 1.2: (a) Termoplastik, (b) Termoset. **8**
Şekil 1.3: 3B tasarım baskı süreci **11**
Şekil 1.4: Stereolitografi 3B yazıcı ve modelleme **12**
Şekil 1.5: Stereolitografi 3B yazıcı parçaları **12**
Şekil 1.6: Stereolitografi 3B yazıcıdan alınan baskı **13**
Şekil 1.7: Eriyik biriktirme modelleme 3B yazıcısı. **14**
Şekil 1.8: Eriyik biriktirme modelleme 3B yazıcısı **14**
Şekil 1.9: Seçici lazer sinterleme (SLS) 3B yazıcı şeması. **16**
Şekil 1.10: Tipik bir LOM 3B süreci türü **16**
Şekil 1.11: Dijital ışık işleme 3B yazıcısı **17**
Şekil 1.12: PLA polimerizasyonu **22**
Şekil 1.13: (a) Geleneksel malzeme, (b) Auxetic malzeme **26**
Şekil 1.14: Oksetik malzemelerin tarihsel gelişim ve keşif çizelgesi. **26**
Şekil 1.15: (a) Auxetic olmayan ve (b) auxetic malzemelerin eğrilikleri **27**
Şekil 1.16: Yeniden girintili desen yapısında değişken geçirgenliği. **27**
Şekil 1.17: Geleneksel ve oksetik malzemelere yük uygulandığındaki davranış. **28**
Şekil 1.18: Hücresel yapının basılma yönü **29**
Şekil 1.19: 2 yönde sıkıştırmaya yönelik FE modelinin ayrıntıları. **29**
Şekil 1.20: 1 yönlü sıkıştırma altında Poisson oranı ve gerinim tepkileri **30**
Şekil 1.21: 2 yönlü sıkıştırma altında gerilim-gerinim grafiği **31**
Şekil 1.22: 1 yönlü düzlem içi sıkıştırmaya maruz kalan PLA yapı **31**
Şekil 1.23: Farklı tasarımlarda üretilen çekirdek yapılar ve ölçüleri **33**
Şekil 1.24: Sandviç panelin test sırasındaki görüntüsü **34**
Şekil 1.25: (a) Bal petek. (b) Takviye-matris. (c) Hücre şekli. (d) Numune. **36**
Şekil 1.26: (e) Darbe testi. (f) Girinti testi **36**
Şekil 1.27: Farklı tasarımlardaki hücre modellerinin gerilim değerleri **38**
Şekil 1.28: Farklı tasarımdaki hücre modellerinin mekanik değerleri. **39**
Şekil 1.29: Farklı hücre tasarımına sahip yapılar **40**
Şekil 1.30: Takviye ve matris malzemesinin gerinim-gerilim grafikleri **41**
Şekil 1.31: Farklı kafes yapı topolijisine sahip tasarımlar **42**
Şekil 1.32: Farklı tasarıma sahip yapıların gerilim-gerinim grafiği **43**
Şekil 1.33: Farklı hücre yapılarına ait Young modül ve enerji absorbsiyon grafiği. **43**
Şekil 1.34: Tek eksenli sıkıştırma testleri altında numunelerin davranışı. **44**
Şekil 1.35: Farklı hücre tasarımlarına göre Poisson oranı-gerilim grafiği **45**
Şekil 1.36: Farklı tasarımdaki modellerin 0,05 gerinimdeki görüntüsü **45**
Şekil 1.37: Çekme testi için üretilmiş numune **46**
Şekil 1.38: Dikdörtgen kesit numuneler için sıkıştırma testi numunesi **47**
Şekil 1.39: Petek panallerin hücre genişlik ölçüleri **48**
Şekil 1.40: Basma testi düzeneği ve numuneri **49**

Şekil 2.1: Two Trees Bluer 3B yazıcı. **51**
Şekil 2.2: PLA filament. **52**
Şekil 2.3: Karbon kumaş 245 g/m^2 (solda), epoksi reçine (sağda). **52**
Şekil 2.4: Bal Peteği kübik modelleme. **54**
Şekil 2.5: Yeniden Girintili kübik modelleme. **54**
Şekil 2.6: Geliştirilmiş Yeniden Girintili kübik modelleme. **55**
Şekil 2.7: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. . **55**
Şekil 2.8: ASTM D638-4 standardında tasarlanan numune. **56**
Şekil 2.9: ASTM D790 standardında tasarlanan numune. **57**
Şekil 2.10: Bal Peteği basma numunesi. **58**
Şekil 2.11: Yeniden Girintili basma numunesi. **58**
Şekil 2.12: Geliştirilmiş Yeniden Girintili basma numunesi. **58**
Şekil 2.13: Bal Peteği üç nokta eğme testi numunesi. **59**
Şekil 2.14: Yeniden Girintili üç nokta eğme testi numunesi. **59**
Şekil 2.15: Geliştirilmiş Yeniden Girintili üç nokta eğme testi numunesi. **60**
Şekil 2.16: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. **60**
Şekil 2.17: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. **61**
Şekil 2.18: Çekme ve üç nokta eğme testi numunelerinin üretimi. **61**
Şekil 2.19: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. **62**
Şekil 2.20: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. **62**
Şekil 2.21: Shimadzu AG-X-plus serisi mekanik test cihazı. **64**
Şekil 2.22: Üç nokta eğme test prensibi. **65**
Şekil 2.23: a) Basma kuvveti yok, b-c) Fıçı oluşumu başlangıcı-tamamlanması. **67**
Şekil 2.24: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili. **69**
Şekil 3.1: ASTM D638-4 standardına göre çekme testi sonuç grafiği. **71**
Şekil 3.2: ASTM D790 standardına göre üç nokta eğme testi sonuç grafiği. **72**
Şekil 3.3: Üç nokta eğme mukavemet deneysel ve analiz sonuç grafiği. **74**
Şekil 3.4: Basma mukavemet deneysel ve analiz sonuç grafiği. **76**

OKSETİK (AUXETIC) KOMPOZİT MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Son yıllarda eklemeli imalat (Eİ) olarak hayatımızda yer alan üç boyutlu yazıcı teknolojisi hızla yaygınlaşmakta ve gelişmektedir. Uzay, savunma, havacılık, spor, otomotiv, gıda, biyomedikal, inşaat ve tıp gibi alanlarda hızlı bir şekilde yer bularak son zamanların en yaygın kullanılan teknolojileri arasındadır. Üç boyutlu yazıcıların farklı tipleri ve çalışılabilecek geniş malzeme yelpazesiyle metal ve seramik malzemelerin yanısıra termoplastik malzemelerinde yaygın kullanımıyla bilimsel araştırmalarda farklı konuların ele alınması mümkün olmuştur. Üç boyutlu yazıcılarda PLA (Polilaktik Asit) malzemesi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PLA termoplastik polimerler olduğu için geri dönüştürülebilir malzemedir. PLA, biyo çözünür özelliği ile medikal ve ambalaj alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, sandviç kompozitlerde yenilikçi çekirdek yapı tasarımı ve üretimi gerçekleştirmek için eklemeli imalat yöntemi kullanılmıştır. Pozitif Poisson oranına sahip oksetik olmayan geleneksel Bal Peteği yapısı ile negatif Poisson oranına sahip Yeniden Girintili ve tasarımda modifikasyon gerçekleştirilerek Geliştirilmiş Yeniden Girintili çekirdek tasarımı üretilmiştir. Üç farklı tasarıma sahip yapılar için eklemeli imalat yöntemi ile katmanlı üretim gerçekleştirilmiştir. Çekme, üç nokta eğme ve basma testi için ASTM standartlarına uygun numuneler üretilmiştir. 3B baskı ile üretilen basma ve üç nokta eğme numunelerinin karbon elyaf ve epoksi malzemeleriyle çekirdek yapının alt ve üst yüzeyleri kaplanması sağlanmıştır. Böylece sandviç kompozit yapı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen testlere göre numunelerin mekanik özellikleri ve farklı tasarıma sahip çekirdek hücrelerin Poisson oranları incelenmiştir.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalara göre negatif Poisson oranına sahip oksetik özellikteki Yeniden Girintili tasarımların geleneksel pozitif Poisson oranına sahip oksetik olmayan Bal Peteği tasarımına göre daha üstün üç nokta eğme ve basma dayanım değeri olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın sonucunda üç nokta eğme testine göre Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıda geleneksel Bal Peteği ve Yeniden Girintili sandviç yapıya göre daha yüksek mukamevete sahip olduğu gözlemlenmiştir. Üç nokta eğme testinde Bal Peteği sandviç yapı 142,15 MPa, Yeniden Girintili sandviç yapı 150,68 MPa ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı 160,83 MPa değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen basma testine göre Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıda geleneksel Bal Peteği ve Yeniden Girintili sandviç yapıya göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu gözlemlenmiştir. Basma testinde Bal Peteği sandviç yapı 88,7 MPa, Yeniden Girintili sandviç yapı 114,66 MPa ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı 125 MPa değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında en yüksek üç nokta eğme ve basma dayanımına sahip Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı olduğu hem deneysel, hem de analiz verilerine göre doğrulanmıştır. En düşük üç nokta eğme ve basma dayanımına sahip tasarım ise geleneksel Bal Peteği sandviç kompozit yapısına ait olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, Üç boyutlu yazıcı, PLA, Oksetik, Negatif Poisson, Mekanik özellikler.

DEVELOPMENT OF AUXETIC COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

In recent years, three-dimensional printing technology, which has become part of our lives as additive manufacturing (AM), is rapidly becoming widespread and developing. It is among the most widely used technologies of recent times, rapidly finding a place in fields such as space, defense, aviation, sports, automotive, food, biomedical, construction and medicine. With the different types of three-dimensional printers and the wide range of materials that can be worked with, and the widespread use of thermoplastic materials as well as metal and ceramic materials, it has become possible to address different topics in scientific research. PLA (Polylactic Acid) material is widely used in three-dimensional printers. Since PLA is thermoplastic polymers, it is a recyclable material. PLA is widely used in the medical and packaging fields with its biodegradable feature.

Within the scope of this study, additive manufacturing method was used to realize innovative core structure design and production in sandwich composites. A non-auxetic traditional Honeycomb structure with a positive Poisson ratio and a Re-entrant core design with a negative Poisson ratio and an Improved Re-entrant core design by modification of the design were produced. Additive manufacturing was carried out using the additive manufacturing method for structures with three different designs. Samples complying with ASTM standards were produced for tensile, three-point bending and compression tests. The upper and lower surfaces of the core structure were covered with carbon fiber and epoxy materials of the compression and three-point bending samples produced by 3D printing. Thus, a sandwich composite structure was created. According to the tests performed, the mechanical properties of the samples and the Poisson ratios of the nuclear cells with different designs were examined.

According to studies carried out in the literature, it has been determined that auxetic Re-entrant designs with negative Poisson's ratio have superior three-point bending and compressive strength values than the traditional non-auxetic Honeycomb design with positive Poisson's ratio.

As a result of this study, it was observed that the Improved Re-entrant sandwich structure had higher strength than the traditional Honeycomb and Re-entrant sandwich structure, according to the three-point bending test. In the three-point bending test, it is seen that the Honeycomb sandwich structure reaches 142.15 MPa, the Re-entrant sandwich structure reaches 150.68 MPa and the Improved Re-entrant sandwich structure reaches 160.83 MPa.

According to the compression test performed, it was observed that the Improved Re-entrant sandwich structure had higher strength than the traditional Honeycomb and Re-entrant sandwich structure. In the compression test, it is seen that the Honeycomb

sandwich structure reaches 88.7 MPa, the Re-entrant sandwich structure reaches 114.66 MPa and the Improved Re-entrant sandwich structure reaches 125 MPa.

Within the scope of this study, it has been confirmed according to both experimental and analysis data that it is an improved re-entrant sandwich structure with the highest three-point bending and compressive strength. It was determined that the design with the lowest three-point bending and compressive strength belonged to the traditional honeycomb sandwich composite structure.

Keywords: Additive manufacturing, three-dimensional printer, PLA, oxetic, negative Poisson, mechanical properties.

1. GİRİŞ

Azaltılmış ağırlıkları ve geliştirilmiş mekanik özellikleri nedeniyle sandviç yapılardaki kafes çekirdeklerin kullanımında artan bir ilgi vardır. Bu yapıların en eski ve en yaygın kullanılan modellerden biri doğadan esinlenerek tasarlanan bal peteği çekirdekli sandviç yapıdır [1, 2]. Son yıllarda hücresel yapılar aynı zamanda sandviç kompozitlerin çekirdek malzemesi olarak sıkça kullanılmaktadır [3]. Sandviç yapıların hücresel tasarımları, üretilen malzemenin mekanik davranışını belirler. Ayrıca akustik, termal ve biyolojik özellikler gibi çok çeşitli özellikleri etkileyebilir [4]. Hücresel malzemelerin özellikleri yalnızca katı bileşenler tarafından değil aynı zamanda boşlukların ve katıların uzamsal konfigürasyonu, yani hücresel mimari tarafından da belirlenir. Geleneksel bal peteği yapısının yanı sıra oksetik yapı türleri de çekirdek malzemesi olarak kullanılabilir [5]. Oksetik hücresel yapılar, diğer geleneksel hücresel malzemelerle karşılaştırıldığında bazı benzersiz ve gelişmiş mekanik özelliklere sahip olan, negatif Poisson oranına sahip malzemelerdir. Negatif Poisson oranına sahip oksetik hücresel yapılar; çekme kuvvetine dik yönde incelen yaygın malzemelerin aksine, gerildiğinde her yöne genişler ve sıkıştırıldığında her yöne büzülür [6]. Sandviç yapılarda kullanılan çekirdek malzemesinin imalatında kullanılan geleneksel yöntemler, farklı geometrilere sahip yapılar için birçok sınırlamaya sahiptir [7]. Eklemeli imalat (Eİ) veya 3B baskı, fiziksel modellerin ve karmaşık geometrik yapıların yüksek doğrulukta ve düşük maliyetli üretimini sağlayan, son zamanlarda hızla genişleyen ileri bir üretim teknolojisidir [8].

Köpüklerin ve aerojellerin rastgele hücresel mimarisi, bağların bükülme ağırlıklı deformasyonuna neden olur ve gözeneklilik arttıkça mukavemet ve sertlikte hızlı bir azalmaya neden olur. Buna karşılık, belirli düzenli kafes tipi hücresel mimariler neredeyse optimal esnemenin hakim olduğu özelliklere sahip olabilir, bu da mukavemet ve sertliğin malzemenin katı hacim oranıyla orantılı olarak ölçeklendiği malzemelerle sonuçlanır [9].

Sandviç yapılar; yüksek mukavemetleri, yüksek sertlik-ağırlık oranları ve mükemmel enerji emme yetenekleri nedeniyle havacılık, denizcilik, otomotiv ve ulaşım

endüstrilerinde kullanılmak üzere giderek daha fazla araştırılmaktadır [10, 11]. Sandviç yapı, esas olarak düzlem içi yük ve eğilme momentlerini taşıyan iki dış katmandan, girinti veya ezilmeyi koruyan bir iç çekirdekten oluşur. Bu nedenle sandviç yapı, darbe yüklemesi sırasında enerjinin dağıtılmasında önemli bir rol oynar. Uygun çekirdek topolojisine sahip hafif sandviç yapıların kullanılması, yüksek sertlik-ağırlık oranı ve yüksek enerji emme kapasitesi gibi birçok avantaja sahiptir [12].

1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, fiziksel ve kimyasal açıdan makroskobik ölçüde farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi, son birleşimin her bir bileşenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip olması olarak tanımlanabilir [13, 14]. Bu kombinasyon, matris fazı [15, 16] olarak adlandırılan, diğer malzemelerin içine gömülmüş fiberler, parçalar veya parçacıklar [17, 18] formundaki takviye fazından oluşur. Takviye fazı yük taşıyıcıdır, aynı zamanda yapıya mukavemet ve mekanik özellikler katmaktadır. Matris fazı ise takviye malzemesinin bağlayıcısı olarak görev yapar ve yükü lifler arasında dağıtır. Matris aynı zamanda fiber malzemeyi kompozit işleme öncesinde, sırasında ve sonrasında hasardan koruyan bir malzeme görevi de görür [19]. Böylece tek tek kullanılan malzemelerden daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler üretebilmektedir [20, 21]. Diğer bir faz ise arayüz fazıdır. Arayüz fazı, fiber ile polimer matris arasındaki ortak sınırdır ve bu sınır sayesinde yük, gerinim uyumluluğuna bağlı olarak matristen fiberlere aktarılabilir. Ara yüzey zamanından önce deformasyona uğrarsa, matrisin deformasyonu (gerinimi), fiberin deformasyonu ile uyumlu değildir, bu da yükün zayıf bileşenden (matris fazı), güçlü bileşene (takviye fazı-fiber) aktarılamaması ile sonuçlanır. Yani fiberlerin polimer matris üzerindeki güçlendirici etkisi sağlanamamaktadır. Bu nedenle arayüzdeki gerinim uyumluluğu polimer matrisli kompozitlerin bütünlüğü açısından çok önemlidir [22, 23].

Kompozitlerin ilk kullanımları M.Ö. 1500'lü yıllara dayanmaktadır. İlk Mısırlılar ve Mezopotamyalılar güçlü ve dayanıklı binalar inşa etmek için çamur ve saman karışımını kullanmıştır. Saman, çanak çömlek ve tekneler gibi kompozit ürünlere takviye sağlamaya devam etmiştir. M.S. 1200 yılında Moğollar ilk kompozit yayı icat etmiştir. Tahta, kemik ve hayvan tutkalı kombinasyonu kullanılarak yaylar preslenmiş ve huş ağacı kabuğuyla kaplanmıştır. Kompozitten üretilen Moğol yayları, savaşlarda

üstünlük sağlamış ve kompozit teknolojisi nedeniyle bu silah, barutun icadına kadar dünyadaki en güçlü silah olarak tarihe geçmiştir [24].

Kompozitlerin modern çağı, bilim adamlarının polimerleri geliştirmesine kadar başlamamıştır. O zamana kadar bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen doğal reçineler, yapıştırıcı ve bağlayıcıların tek kaynağıydı. 1900'lerin başında vinil, polistiren, fenolik ve polyester gibi plastikler geliştirilmiştir. Bu yeni sentetik malzemeler doğadan elde edilen reçinelerden daha iyi performans göstermiştir. Ancak plastikler tek başına yapısal uygulamalar için yeterli gücü sağlayamamıştır. Güç ve sağlamlık elde etmek için takviyeye ihtiyaç bulunmaktadır. Kompozit malzemeler insanlık tarihi boyunca çeşitli şekillerde bilinsede modern kompozitlerin tarihi muhtemelen 1937 yılında Owens Corning Fiberglass Company'nin cam elyaf satışının gerçekleşmesiyle başlamıştır. Cam elyaf 1930 yılında neredeyse tesadüfen bulunmuştur. 1930'da yalıtım amaçlı bir cama yazı uygulama işlemi sırasında oluşan bir elyafın ilgi odağı haline gelmesiyle yapılmış, yapısal ürünler çok geçmeden gelişmeyi takip etmiştir. Cam elyaf şirketleri, uçak bölümlerini ve düzeneklerini oluşturmak, parçaları bir arada tutmak için kullanılan birçok aletin güçlü, ince ve genellikle bileşik eğrilerle şekillendirilmiş olması gerektiğinden, uçak endüstrisinin bu yeni malzeme türü için muhtemel bir müşteri olduğunu fark etmiştir. Metal bu kriterleri kolayca karşılayamamaktadır, bu nedenle cam elyaf ile güçlendirilmiş üretim kalıpları birçok mühendislik uygulaması için tercih edilen malzeme haline gelmiştir. 1935 yılında Owens Corning ilk cam elyafı piyasaya sürmüştür. Cam elyaf, plastik bir polimerle birleştirildiğinde inanılmaz derecede güçlü ve aynı zamanda hafif bir yapı oluşturmaktadır. Bu, bugün bildiğimiz fiber takviyeli polimerler endüstrisinin başlangıcı olarak bilinmektedir [25, 26].

Kompozitlerdeki en büyük ilerlemelerin çoğu savaşla sağlanmıştır. Moğolların kompozit yayı geliştirmesi gibi, İkinci Dünya Savaşı'da fiber takviyeli polimerler endüstrisini laboratuvardan fiili üretime geçirmiştir. Askeri uçaklardaki hafif uygulamalar için alternatif malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Mühendisler çok geçmeden kompozitlerin hafif ve güçlü olmasının ötesinde başka faydalarını da fark etmiştir. Cam elyaf kompozitlerin radyo frekanslarına karşı geçirgen olduğu keşfedilmiş ve malzeme kısa süre sonra elektronik radar ekipmanlarında kullanılmak üzere uyarlanmıştır [25, 26].

İkinci Dünya Savaşı'nın sonuna gelindiğinde küçük bir niş kompozit endüstrisi tüm hızıyla faaliyet göstermektedir. Askeri ürünlere olan talebin azalmasıyla birlikte, birkaç kompozit yenilikçisi artık iddialı bir şekilde kompozitleri diğer pazarlara sunmaya çalışmıştır. Teknelerin kompozitler için çok uygun olduğu gözlemlenmiş ve ilk ticari tekne gövdesi 1946'da piyasaya sürülmüştür. Bu dönemde, genellikle kompozitlerin büyükbabası olarak anılan Brandt Goldsworthy, yeni üretim süreçleri ve ürünleri geliştirmiştir. Sporda devrim yaratan bir sörf tahtasının cam elyafını ilk üreten kişi olarak birçok ilerlemeyle tanınmaktadır. Goldsworthy ayrıca pultrüzyon olarak bilinen bir üretim sürecini de icat etmiştir. Günümüzde bu süreçten üretilen ürünler arasında merdiven rayları, alet kulpları, borular, ok milleri, zırh, tren zeminleri, tıbbi cihazlar ve daha fazlası yer almaktadır [25, 26].

1970'lerde kompozit endüstrisi daha da olgunlaşmaya başlamıştır. Daha iyi plastik reçineler ve geliştirilmiş takviye elyafları geliştirilmiştir. DuPont, Kevlar olarak bilinen bir aramid elyaf geliştirmiş ve bu elyaf, yüksek mukavemeti nedeniyle zırhların kullanımında standart haline gelmiştir. Karbon fiberler de bu süreçte geliştirilmiş ve o zamandan beri tercih edilen yeni malzeme olarak metalin yerini almaktadır. Kompozit endüstrisi halen gelişmekte ve büyümenin büyük bir kısmı artık yenilenebilir enerjiye odaklanmaktadır. Rüzgar türbini kanatları sürekli olarak boyut sınırlarını zorlamaktadır. Gelişmiş malzemeler, tasarımlar ve üretim gerektirmektedir. Metalik alaşımların aksine her malzeme kendine ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korumaktadır [25, 26].

Kompozit malzemeler son yıllarda mevcut olan en umut verici ve ayırt edici malzeme olarak bilinmektedir. Kompozit malzemeler; yüksek mukavemetli, hafif, yüksek dayanıklılık, sertlik, sönümleme özelliği, bükülme mukavemeti ve korozyona, aşınmaya, darbeye ve yangına karşı dayanım özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [27].

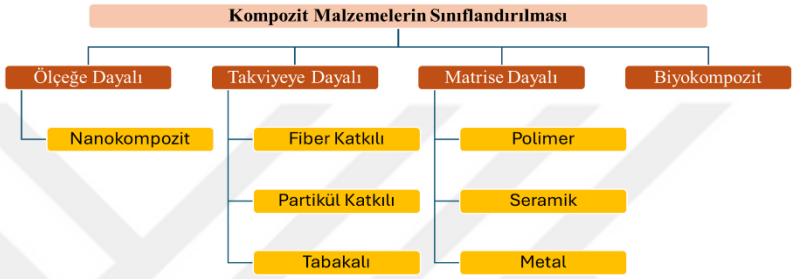
Bununla birlikte özellikle fiber takviyeli polimer kompozitlerin işlenmesi geleneksel üretimlere göre yavaş ve zorludur. Aynı zamanda işleme sistemlerinde takım ömrünün azalttığı bilinmektedir [28]. Bunun yanı sıra hizmet ömrünü tamamladıktan sonra geri dönüşüm ve imha edilme problemleriyle karşılaşılmaktadır [29]. Geleneksel malzemelere göre daha fazla maliyetlidir [29].

Kompozit malzemeler; otomotiv [30], spor [31], havacılık [32], savunma sanayi [33], denizcilik [34], enerji, raylı sistemler, inşaat, elektrik-elektronik, medikal, eğlence,

tarım, ambalaj, kalıpçılık, eklemeli imalat ve daha birçok endüstriyel alanda sıkça kullanılmaktadır [35].

1.1.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviyenin şekline ve matris tipine göre sınıflandırılabilir [35]. Kompozit malzemenin bileşenleri özelliklerini etkilediğinden, bunların sınıflandırılması ve farklı özelliklerini ayrıntılı olarak incelemeye ihtiyaç vardır [35]. Kompozit malzemeler, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi kullanılan bileşenlerin türüne göre sınıflandırılır .



Şekil 1.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [35].

1.1.1.1 Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler (MMK), monolitik muadillerine göre daha yüksek spesifik mukavemet ve spesifik elastik modül sergilemektedir. Ayrıca hafiflik, yüksek sertlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek elektrik iletkenliği, iyi boyutsal kararlılık, yüksek sönümleme kapasitesi ve mükemmel aşınma direnci de sergileyebilirler [36]. Metal matrisli kompozitler; matrisin, metal yada metal bazlı alaşımlar içerdiği bir kompozit çeşididir. Yüksek sıcaklıklarda iyi performans göstermektedir [37]. Alüminyum (Al), magnezyum (Mg), titanyum (Ti), nikel (Ni), bakır (Cu), çinko (Zn), tungsten ve intermetalikler en yaygın kullanılan matris türü arasında yer almaktadır [38]. Yüksek özgül ağırlık, düşük süneklik, ara yüzey oluşma problemleri, düşük korozyon direnci, sertleştikçe malzemeleri kesme zorluğu ve yüksek üretim maliyeti geleneksel metallere malzemelere göre dezavantajları olarak bilinmektedir [39, 40].

MMK'ler havacılık, otomobil, demiryolu taşımacılığı, deniz taşımacılığı, savunma, uzay, paketleme, elektronik, spor, eğlence ve altyapı sektörlerinde vb. yaygın olarak kullanılmaktadır [41-45].

1.1.1.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramikler genel olarak çok güçlü iyonik bağ, bazı durumlarda ise kovalent bağ sergileyen katı malzemeler olarak tanımlanabilir. Yüksek erime noktaları, iyi korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda stabilite, düşük yoğunluk, kimyasal inertlik, yüksek elastisite modülü ve yüksek basınç dayanımı seramik bazlı matris malzemelerini, 1500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yol vermeyen yapısal malzeme gerektiren uygulamalar için favori kılar. Çoğu seramiğin sahip olduğu yüksek elastisite modülü ve düşük çekme gerilimi, mukavemet artışı elde etmek için takviye ekleme girişimlerinin başarısız olmasına neden olmuştur. Bunun nedeni, seramiklerin koptuğu stres seviyelerinde, matrisin yetersiz uzamasının kompozitin takviyeye etkili bir kuantum yük aktarmasını engellemesi ve fiber hacim yüzdesi yeterince yüksek olmadığı sürece kompozitin başarısız olabilmesidir. Matrisin yük taşıma kapasitesinde bir artış sağlamak amacıyla fiberin daha yüksek gerilme mukavemetinden yararlanmak için bir malzeme takviye edilmektedir [46].

Gevrek yapıya sahip SMK'ler darbelere karşı dayanıklı değildir. Termal şoka karşı son derece hassastır. SMK'ler imalat ve işleme sırasında kolaylıkla hasar görebilir [2].

SMK'ler nükleer [47] uzay [48], roket motorları [49], türbin motorları [50, 51], havacılık [52], otomotiv [53] ve özel uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

1.1.1.3 Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer matrisli kompozitler (PMK); karbon, cam, kevlar, metal fiberlerin dağılmış takviyesi ile termoset veya termoplastik matrislerden oluşur [54-57]. Polimerler kolay işlenebilmeleri, hafif olmaları ve istenilen mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle ideal malzemelerdir [58]. İki ana polimer türü termosetler ve termoplastiklerdir. Termosetler kürlendikten sonra iyi bağlanmış üç boyutlu moleküler yapı gibi niteliklere sahiptir. Termosetler, daha yüksek mukavemetleri ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri nedeniyle termoplastiklere göre kullanımda daha popülerdir [59]. Termosetler, reçinenin sertleştirici ile karıştırılmasıyla hazırlanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar ince fiber ve polimer katmanlarının istiflenmesi, yapıştırılmasıyla yapılan laminer yapı yaygın olarak kullanılır. PMK'ler, kolay kullanım teknikleri ve basit imalat yöntemleri nedeniyle düşük maliyetli kompozitlerdir [60].

Havacılık, savunma, otomotiv, rüzgar enerjisi ve boru imalat endüstrilerinde cam, karbon ve aramid elyaf bazlı kompozitlere büyük bir talep vardır [61].

1.1.2 Matris malzemeleri

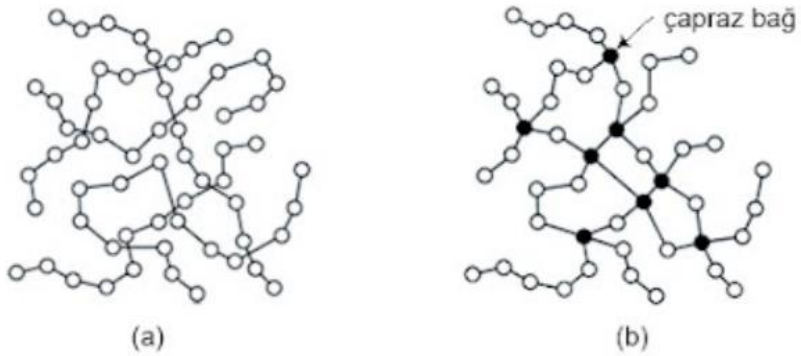
Kompozitlerin yüksek mukavemetinin büyük ölçüde fiber takviyesinden kaynaklandığı şüphesiz doğru olsa da, fiberlere destek sağladığı ve fiberlerin yük taşımasına yardımcı olduğu için matris malzemesinin önemi göz ardı edilemez. Ayrıca kompozit malzemeye stabilite sağlamaktadır. Reçine matris sistemi, fiberlerin gömülü olduğu yapısal bir bileşende bağlayıcı madde görevi görür. Çok fazla reçine kullanıldığında parça reçine açısından zengin olarak sınıflandırılır. Öte yandan çok az reçine varsa parçaya reçinesiz denir. Reçine açısından zengin bir parça, fiber desteğinin olmaması nedeniyle çatlamaya karşı daha hassastır; oysa reçineden yoksun bir parça, boşluk alanları ve fiberlerin bir arada tutulmaması ve iyi desteklenmemesi nedeniyle daha zayıftır [62, 63].

1.1.2.1 Termoplastik malzemeler

Termoplastik malzemeler bir veya iki boyutlu moleküler yapıya sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda yumuşatma işleminin, soğutma sırasında özelliklerini yeniden kazanmak için tersine çevrilebilmesi ve bu da bileşiklerin kalıplanması için geleneksel sıkıştırma tekniklerinin uygulanmasını kolaylaştırmasıdır. Termoplastik malzemeler ısıya maruz kalarak yumuşar ve yeniden şekillendirilebilir. Bunun sebeebi yapılarındaki doğrusal ve lineer yapıda zincirlerin birbiri arasındaki bağlanmanın zayıf olmasından kaynaklanır. Temoplastik malzemelerin yapısında Van der Waals bağları bulunmaktadır. Belirli bir termoplastik malzeme için servis sıcaklığı, yumuşamaya başladığı camsı geçiş sıcaklığı (Tg) ile karar verilir. Servis sıcaklığı, belirli bir özelliğin, malzemenin veya bileşenin performansından veya bütünlüğünden ödün vermeden en iyi şekilde çalışabileceği sıcaklık aralığıdır. Artan sıcaklıkla birlikte, bir malzemenin atomları daha geniş bir alan içinde dalgalanarak yoğunluğun azalmasına (hacim artışı) neden olur ve bu da her çeşitli reaksiyonların meydana gelme olasılığını artırır [64].

Termoplastik reçine bazlı kompozitler, iyi bilinen termoset reçinelere göre, daha yüksek tokluk özelliklerinden dolayı daha yüksek darbe direnci gibi çeşitli avantajlar sunar. Polietereterketon (PEEK), Polieterimit (PEI) ve Polifenilen sülfit (PPS) gibi yüksek sıcaklık termoplastik reçineleri, ticari termoplastik malzemelerin klasik

avantajlarıyla karşılaştırıldığında genellikle gelişmiş mekanik özellikler sunduklarından umut verici malzemelerdir. Ayrıca termoplastikler, camsı geçiş sıcaklıklarına kadar fiziksel özelliklerini korurlar ve uzun vadede bile iyi bir termal stabilite sergilerler [65, 66]. Şekil 1.2'de termoplastik ve termoset yapıları verilmiştir.



Şekil 1.2: (a) Termoplastik, (b) Termoset [65, 66].

Yaygın polimerik kompozitlerde kullanılan termoplastik matris malzemeleri;

- Polietereterketon (PEEK)
- Polieterimit (PEI)
- Polifenilen sülfit (PPS)

1.1.2.2 Termoset malzemeler

Termoset polimerler (aynı zamanda termosetler olarak da adlandırılır), bir ısıtma adımı sırasında geri dönülemez bir şekilde katı bir malzemeye yol açan sıvı bir çözeltiden başlayarak oluşturuldukları gerçeğiyle karakterize edilen bir plastik ailesidir. Bu anlamda, bazı istisnalar dışında, uygun bir sıcaklığa ısıtıldığında tersinir bir katıdan sıvıya geçiş gösteren termoplastik polimerlerden zıt bir davranış sergilerler. Geri dönüşü olmayan sıvıdan katıya geçiş, UV veya elektron ışını ışınlaması gibi başka yollarla da üretilebilmesine rağmen, ortaya çıkan ürünler aynı zamanda termoset polimerler olarak da adlandırılır. Başlangıçtaki sıvı çözeltinin katıya dönüştürüldüğü süreç genellikle farklı ısıyla sertleşen moleküller arasında kimyasal bağlantılar oluşturmaya yöneliktir. Bu tür bir işleme çapraz bağlama (veya kürleme) adı verilir . Sertleşmenin ardından oluşan çapraz bağlar yalnızca polimer moleküllerinin hareketini sınırlamakla kalmaz, aynı zamanda bu moleküllerin içindeki atomlar, moleküller arası çekimlerden daha büyük bir derecede engellenir. Başlangıçtaki sıvı çözelti genellikle çeşitli bileşenlerden oluşur; bunların en önemlileri, ısıtma, UV

ışınımı vb. gibi harici bir etkiyle kendi aralarında reaksiyona girebilen komonomerlerin bir karışımıdır. Tek bir monomerin kendi kendine reaksiyonu da kullanılabilir. Bileşenlerin geri kalanı başlatıcılar, katalizörler, kauçuklar, dolgu maddeleri, lifler, pigmentler vb. olabilir. Isıyla sertleşen bir polimer üretmek için gerekli koşul, tek monomerin veya bir veya daha fazla komonomerin molekül başına üç veya daha fazla reaktif gruba sahip olmasıdır. Bu, tüm reaksiyon hacmini kaplayan üç boyutlu çapraz bağlı bir yapı üretir. Kimyasal reaksiyon çoğu durumda geri döndürülemez, dolayısıyla elde edilen malzemenin sıvı hale dönüştürülmesi, üretilen kovalent kimyasal bağların kırılmasını gerektirecektir. Bu süreç, başlangıçtaki komonomerlerin geri kazanılması yerine malzemenin bozulmasına yol açar. Bu, ısıyla sertleşen bir polimere yol açan proses üzerinde ciddi bir kısıtlama getirir. Kimyasal reaksiyon tamamlandıktan sonra nihai malzemeye yeniden şekil verilmesi mümkün değildir. Özetle termoset malzemeler, kimyasal veya ısı yardımıyla kürlenen, yapılarında çapraz bağa sahip olan rijit malzemelerdir. Uzun ömürlü ve ısıya dayanıklıdırlar. Isıtıldığında tekrar geri dönüştürülemezler [67-69].

Yaygın polimerik kompozitlerde kullanılan termoset matris malzemeleri;

- Poliester (PES)
- Vinilester
- Epoksi [69]

Yaygın polimerik kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri;

- Cam elyaf
- Karbon elyaf
- Aramid elyaf [69]

1.1.2.3 Elastomerler

Yapıları, kendi üzerine katlanmış uzun polimer zincirlerinden oluşur. Malzemenin elastikiyetini artırmak için vulkanizasyon yapılır. Daha az ya da çok sert üç boyutlu bir ağ oluşturmak için moleküler zincirlerin esnekliğini ortadan kaldıran sertleştirme işlemi vulkanizasyon olarak bilinir. Üzerine bir kuvvet uygulandığında yapı elastik bir şekilde deforme olur, ancak kuvvet sona erdiğinde yapı eski haline döner. İlk boyutlarına kıyasla %500 daha fazla uzama kapasitesine sahip elastomerler vardır. En

yaygın örnek elastomere kauçuktur. Kullanım alanları yalıtkan malzemeler, lastikler, ayakkabı tabanları ve sızdırmazlık malzemeleridir [70, 71].

1.2 Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojileri

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, bilgisayar ortamında herhangi bir CAD programıyla tasarlanarak parçaların seri bir şekilde üç boyutlu katı nesnelerin üretimini sağlayan eklemeli imalat yöntemidir. Üç boyutlu model baskı sırasında üç boyutlu yazıcı ile ergitilen malzemenin katman katman yazıcı yatağı üzerinde birbirine eklenerek oluştuğu için eklemeli imalat yöntemleri arasında yerini almaktadır [72]. Eriyik veya toz partikül halindeki malzemelerin katman katman yığma tekniği ile biriktirilerek ürün oluşumu gerçekleşmektedir [73, 74].

Üç boyutlu yazıcılar Charless Hull'ın yaptığı çalışmalar doğrultusundan 1984 yılı sonrasında gelişmelere başlamıştır. 1988 yılında bir şirket tarafından Selective Laser Sintering (SLS) ve Fused Deposition Modelling (FDM) teknolojileri keşfedilerek renkli baskılar üreten yazıcılar geliştirilmiştir. Z Corporation 1996 yılında yüksek çözünürlüklü katı modelleri basabilen üç boyutlu yazıcıların satışlarına başlamıştır. 2007 yılında Reprap adı ile piyasada açık kaynak kodlu yazıcılar görülmeye başlandı. Bu doğrultuda üç boyutlu yazıcıların gelişimi günden güne artmaya başlamıştır [75].

Object Geometries şirketi 2008 yılında Connex500 model yazıcısı ile baskı sırasında farklı malzemelerin aynı anda kullanımı ile parça üretimi gerçekleştirmeyi başarmıştır [75].

Marketbot ve 3B System' in geliştirdiği Cubify modelleri ile 2009 yılı sonrasında daha küçük üç boyutlu yazıcılar ile insanların ilgi odağı olmuş ve satışları günden güne artmıştır [75].

Üç boyutlu yazıcılarda imal edilecek bir parçanın yazdırma işlemi için CAD programında tasarımı gerçekleştirilmektedir. Parçalar katı olarak modellendikten sonra STL formatına dönüştürülerek kaydedilir. Ardından STL uzantılı dosyalar üç boyutlu yazıcıların arayüz programına aktarılmaktadır. Arayüz programlarında yazdırılacak olan modelin dilimleme işlemi yapılmaktadır. Dilimleme işleminde modelin baskı hızı, doluluk oranı, katman yüksekliği, işleme yönü, düze sıcaklığı, tabla sıcaklığı, ortalama kullanılan malzeme miktarı ve baskı süresi gibi parametreler ayarlanarak üç boyutlu yazıcılar hazır hale getirilmektedir. Arayüz, ayarlanmış

parametreler ile birlikte model dosyasını katmanlara bölerek yazıcının okuyabileceği özel bir G-Code formatına dönüştürmektedir. Tamamlanan G-Code uzantılı model, üç boyutlu yazıcıya fiziksel olarak modelin üretimi için gönderilmektedir [76, 77]. Şekil 1.3'te 3B baskı süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.3: 3B tasarım baskı süreci [76, 77].

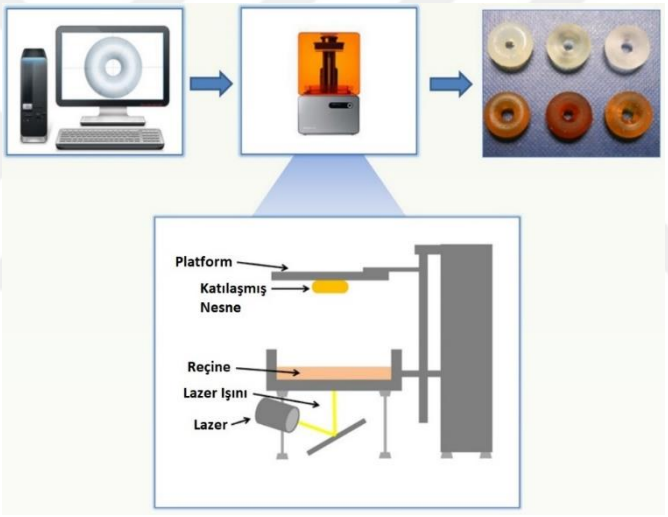
Üç boyutlu yazıcıların delta yazıcı, kartezyen yazıcı ve core xy yazıcı gibi yazıcı yatağı ve ekstrüderin farklı prensiplerde çalışan çeşitleri mevcuttur. Kartezyen prensibinde çalışan üç boyutlu yazıcılar, yazıcı ekstrüderinin kontrolü yardımıyla xyz eksenlerinde hareket sağlayarak programlanan koordinatlar doğrultusunda termoplastik polimerler ile üretim sağlamaktadır. Kartezyen yazıcıların tablası Y ve Z eksenlerinde hareket sağlamaktadır. Delta yazıcılar ise diğer yazıcılara göre dikey Z ekseninde üç adet step motorun senkronize hareketiyle çalışmaktadır. Çünkü delta yazıcı türleri üçgen hareketiyle üretim sağlamaktadır. Core XY prensibiyle çalışan üç boyutlu yazıcılarda X ve Y eksenlerindeki kayışlar boyuncaki hareketleri ile bilinmektedir [75].

Günümüzde en yaygın kullanılan 3B baskı tekniklerinden bazıları şunlardır:

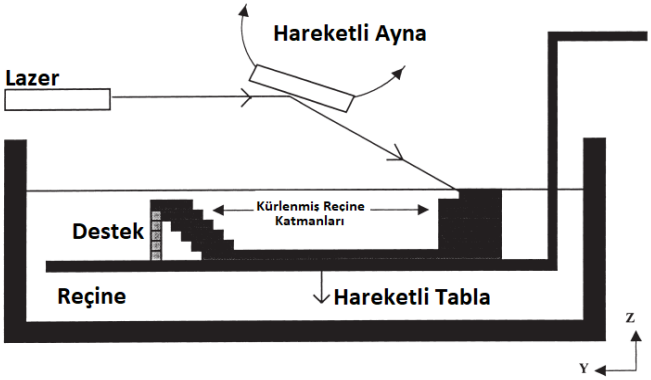
1. Stereolitografi (Stereolithography) (SLA)
2. Kaynaşmış biriktirme modellemesi (Fused deposition modeling) (FDM)
3. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering) (SLS)
4. Lamine nesne imalatı (Laminated object manufacturing) (LOM)
5. Dijital ışık işleme (Digital Light Processing) (DLP)

1.2.1 Stereolitografi (Stereolithography) (SLA)

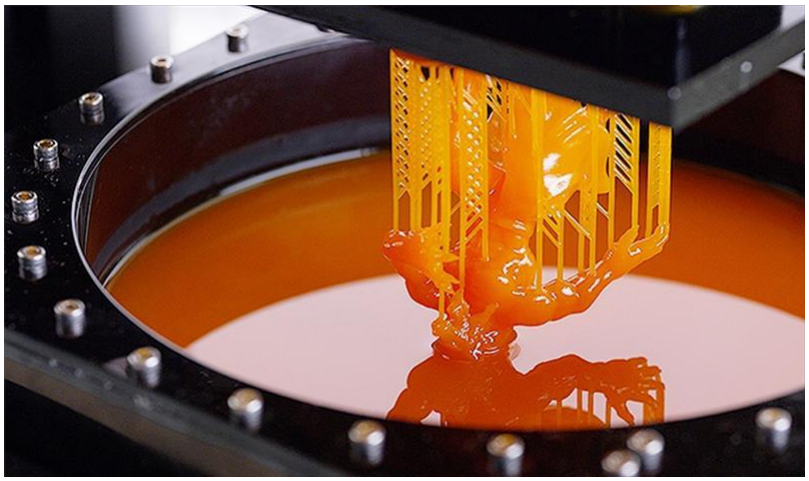
Stereolitografi (SLA) yazıcılar; modeller, desenler ve prototipler oluşturmak için kullanılan bir 3B baskı teknolojisi olarak tanımlanır. SLA yazıcılar, monomerleri fotopolimerize etmek için bir lazer ışını kullanarak katı nesneler oluşturmaktadır [78]. Nesnenin üretimi sırasında bir lazer, sıvı bir reçine teknesinde belirli derinliklerde odaklamalar ile lokal olarak polimerizasyon sağlayarak katı forma gelmesi prensibine dayanır. Bu katılaşma işlemi katman katman 3B nesne bitene kadar devam eder [79, 80]. SLA baskılarda lazerin enerjisi, ışık kaynağının gücü, tarama hızı, lazere maruz kalma süresi, polimer ve başlatıcı miktarları çok önemlidir. Çünkü bu parametrelerin değişiminin sonucu direkt olarak baskıyı da etkilemektedir [81]. Stereolitografi (SLA), doku mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan bir başka 3B baskı teknolojisi türüdür [82, 83]. Şekil 1.4, 1.5 ve 1.6'da SLA baskı teknolojileri gösterilmiştir.



Şekil 1.4: Stereolitografi 3B yazıcı ve modelleme [81].



Şekil 1.5: Stereolitografi 3B yazıcı parçaları [81].



Şekil 1.6: Stereolitografi 3B yazıcıdan alınan baskı [81].

1.2.2 Eriyik biriktirme modellemesi (Fused deposition modeling) (FDM)

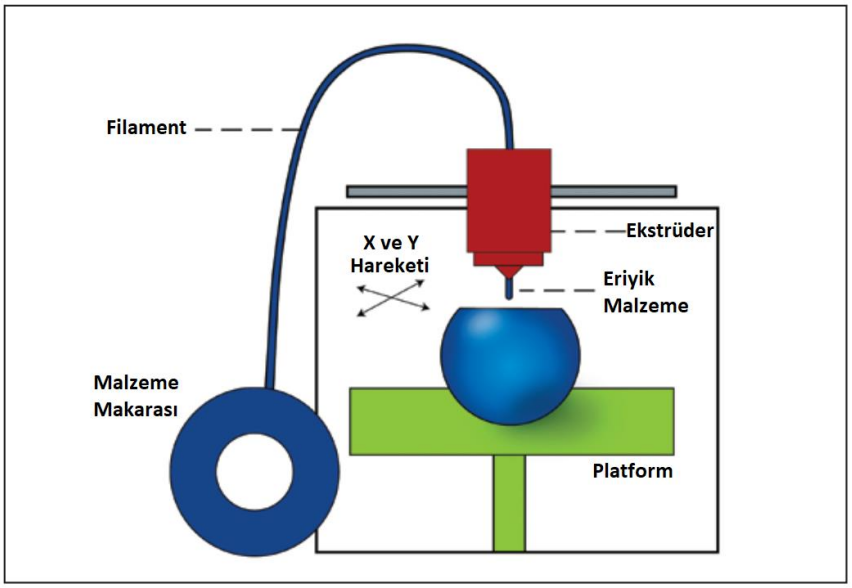
Eriyik biriktirme modellemesi 3B yazıcıları, sürekli ısıtılmış bir ekstrüzyon düzesi içerisinden genellikle 1,75 mm veya 2,85 mm termoplastik filament geçirilerek eriyik hale getirilen ve programlanan eksen hareketlerine göre hareket ederek katman katman yazıcı tablası üzerinde bir yapı oluşturulmasını sağlayan 3B baskı tekniğidir [84]. Son zamanlarda en yaygın şekilde kullanılan 3B yazıcı çeşididir. Eriyik biriktirme modelleme yazıcısı ilk olarak 1988 yılında Scott Crump tarafından ortaya çıkmıştır. 1990 yılında ise Stratasys tarafından ticarileştirilerek eriyik biriktirme modelleme 3B yazıcıları geliştirilmiştir [85].

Avantajları arasında yüksek baskı hızı, malzeme değişim kolaylığı, düşük maliyeti, minimum fire oranı, düşük çalışma sıcaklığı söylenebilir. Ekstrüzyon prensibine dayalı bir method olması onu ucuz ve sağlam donanıma sahip olmasını sağlamaktadır. Farklı malzemelerin kullanılması, istenilen özelliklerin yapılmasına olanak tanımaktadır. Düşük başlangıç maliyeti gerektirir ve maliyetleri düşük fiyatlıdır. İnce cidarlı parçalar için üretim süresi kısa olduğundan, malzeme israfı azdır. Aynı nesne veya katmanda farklı renkler veya filamentler kullanılabilir [84, 85].

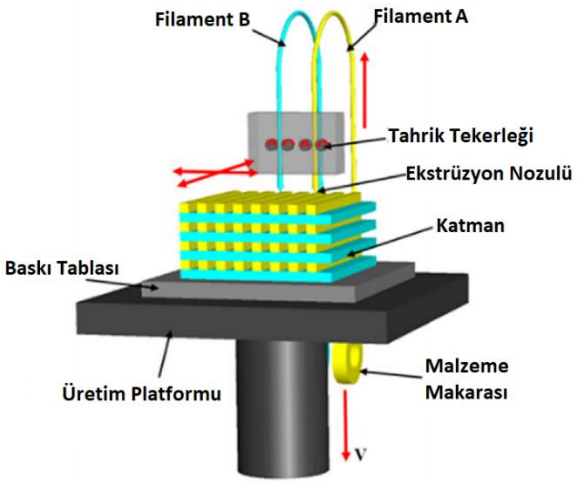
FDM yönteminin avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Çarpılma, düşük çözünürlük ve yüzey kalitesi bu yöntemin bazı dezavantajları arasında yer almaktadır. UV kullanılan teknolojilere nazaran FDM teknolojisinin baskı kafasında yer alan nozül ile sınırlı olmasıda dezavantaj sağlamaktadır. Ek olarak FDM yönteminde 3B yazıcı doğru kalibre edilmediği veya nozül tıkandığı taktirde katmanlar arasında yapışma düşük olur ve mekanik özellikleri olumsuz etkilenir [84, 85].

FDM teknolojisinde 3B parçaların üretilmesinde uygulanan bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler katman kalınlığı, baskı yönü, baskı ve tabla sıcaklığı, baskı hızı, dolgu deseni, dolgu oranı, duvar sayısı ve kalınlığıdır [84, 85].

Seçilen parametrelerin malzemeye uygun olarak belirlenmesi, üretilen parçanın istenilen özelliklerde olması açısından çok önemlidir. Ayrıca bu parametreler üretilen parçanın yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden farklı malzemelerin kullanımı sırasında optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi için araştırmalar devam etmektedir [84, 85]. Şekil 1.7 ve 1.8' de FDM 3B yazıcı teknolojisi gösterilmiştir.



Şekil 1.7: Eriyik biriktirme modelleme 3B yazıcısı [86-88].



Şekil 1.8: Eriyik biriktirme modelleme 3B yazıcısı [86-88].

FDM 3B yazıcılarda filamentler nozulda eriyik hale gelir ve katmanların birbirine kaynaştırıldığı yapı platformuna katman katman ekstrüde edilir. Daha sonra soğuyarak nihai parçalar halinde katılaşır. FDM 3B yazıcılar düşük maliyetli, kullanıcı dostu, yüksek hıza ve basit üretime sahip, farklı malzemelerin aynı anda eriyik hale getirilerek basılması için çoklu ekstrüzyon nozülleri kurulabilerek modifikasyon edilebilir [86-88].

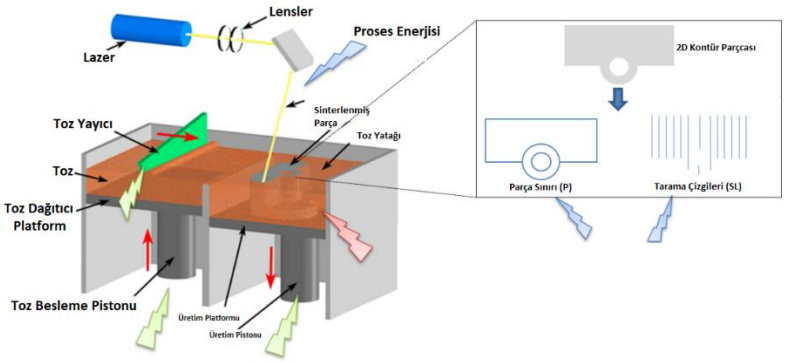
Bunun yanı sıra kullanılabilir malzemenin uygun eriyik viskozitesine sahip termoplastik polimerlerle sınırlı olmasıyla birlikte erimiş viskozite, yapısal destek sağlamak için yeterince yüksek ve ekstrüzyona olanak sağlamak için yeterince düşük olmalıdır. Yazdırma sırasında kullanılan destek yapısının tamamen çıkarılması zor olabilir [86-88].

Bu çalışma kapsamında FDM baskı üretim teknoloji tercih edilmiştir. FDM teknolojisinin tercih edilmesinin en temel sebebi hızlı üretim, düşük cihaz maliyeti ve düşük hammadde maliyetidir. Günden güne yaygınlaşan bu teknoloji kolay ulaşılabilir olması nedeniyle de birçok çalışma da tercih edilmektedir. Ek olarak kompleks ve karmaşık tasarım modellerinin üretimini gerçekleştirebilme kabiliyeti, bu yöntemin tercih sebepleri arasında da yer almaktadır.

1.2.3 Seçici lazer sinterleme (Selective laser sintering) (SLS)

Seçici lazer sinterleme (SLS), plastik, seramik veya cam gibi farklı malzemelerden oluşan küçük bir parçacığın, bir katı oluşturmak için yüksek güçlü bir lazer ışınından gelen ısı kullanılarak birbirine bağlandığı, eklemeli üretim teknolojisinin başka bir şeklidir [89].

SLS kullanılarak basılan nesne, yapı desteklerinin kullanımını zorunlu kılan bir toz malzeme tabakası üzerindedir. Bu husus, üretim maliyetini düşürmenin yanı sıra sarf malzemelerinden tasarruf etmek için dahi uygundur. Üstelik bu teknik, son işlemeye ihtiyaç duymaz [89, 90]. Şekil 1.9'da SLS 3B metodu gösterilmiştir.

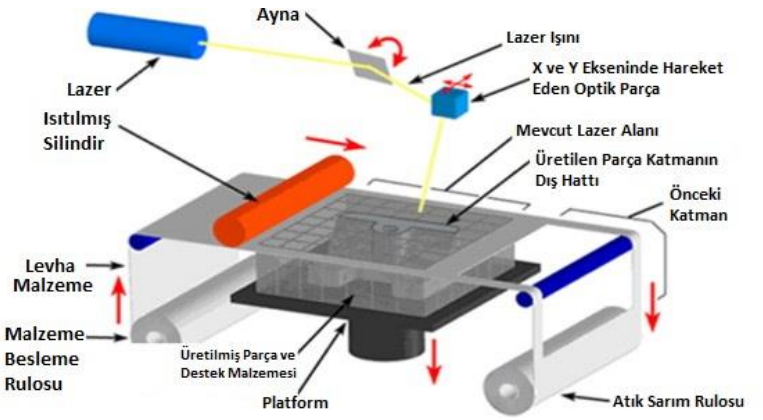


Şekil 1.9: Seçici lazer sinterleme (SLS) 3B yazıcı şeması [91].

1.2.4 Lamine nesne imalatı (Laminated object manufacturing) (LOM)

Lamine nesne imalatı (LOM) tekniğinde, bilgisayar kontrollü bir lazer veya bıçak kullanılarak şekillendirilmek üzere plastik levhaları kaynaştırmak için yüksek basınç ve sıcaklık kullanılmaktadır [91].

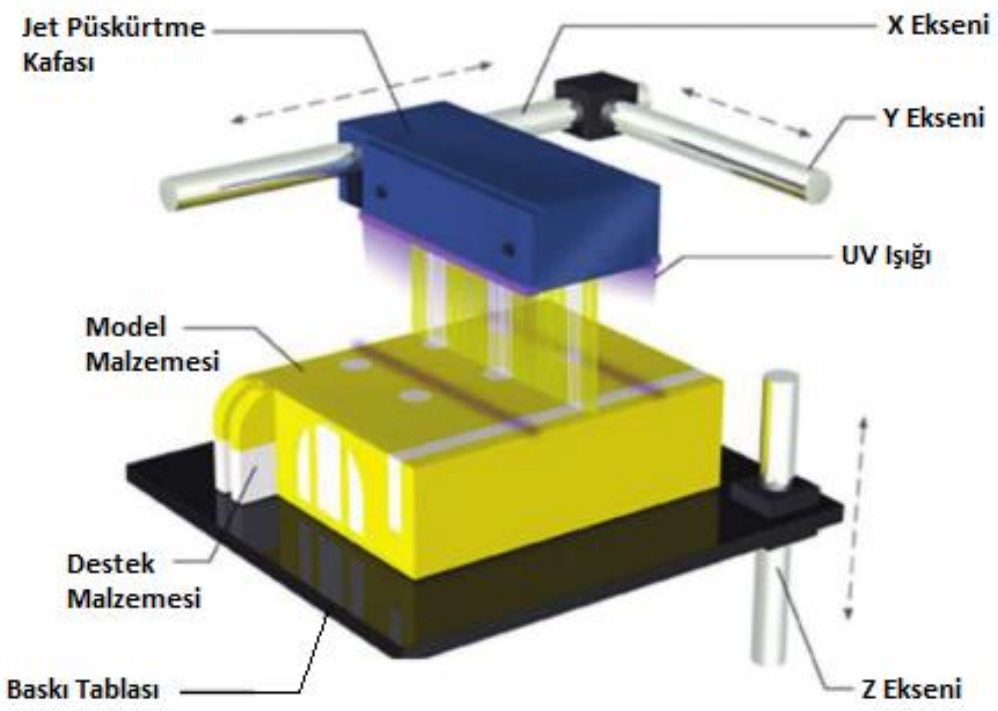
Bu tür yazıcılarla katman malzemesi olarak levha kullanılmaktadır. Levha kalınlıkları genelde 0,05-0,5 mm arasında değişir [92]. Levhalar ilk olarak sıcak silindir vasıtasıyla serilir ve yapıştırılır. Isıtılmış silindir levha üzerine basınç ve sıcaklık uygulayarak ince termoplastik malzemeyi katman katman yüzeye yapıştırır. Her yeni tabaka yapıştırıldıktan sonra CO_2 lazer yardımıyla tabaka kesilme işlemi gerçekleşir. Lazer gücü yalnızca bir katman laminasyonu kesecek şekilde ayarlanır. Tüm katmanlar lamine edilip kesildikten sonra, bitmiş parçayı ortaya çıkarmak için fazla malzeme çıkarılır. Lamine nesne üretimi (LOM) süreci, düşük fiyatlı malzeme kullanmanın yanı sıra hızlı ve işleme vb. avantajları da taşımaktadır. Bu yöntem sayesinde yüksek hızla büyük hacimli parçalar üretilebilmektedir [93].



Şekil 1.10: Tipik bir LOM 3B süreci türü [93].

1.2.5 Dijital ışık işleme (Digital light processing) (DLP)

Dijital ışık işleme (DLP), polyjet tekniği olarakta bilinmektedir. Dijital Işık İşleme (DLP) yönteminde de fotopolimerler kullanılır ve izlenen süreç stereolitografi tekniğine benzemektedir. Dijital ışık işleme 3B yazıcısı ve stereolitografi (SLA) 3B yazıcısında kullanılan ışık kaynağı, aralarındaki tek fark olarak literatürde bilinmektedir. SLA lazer kullanır, DLP ise ışığa duyarlı polimer reçineyi tedavi etmek için geleneksel ışık kaynakları kullanılmaktadır. Bu yöntemde parçalar jet püskürtme kafasından püskürtme yöntemiyle oluşur. Kullanılan malzemeler püskürtme kafasında yer alan UV ışık yardımıyla kürlenir. Katman kalınlıkları 16 µm'ye kadar basılabilir. Bu teknoloji sayesinde birçok malzeme ile hassas, modelin gerçek boyutlarına yakın bir şekilde çalışılabilmektedir. Medikal uygulamalar için tercih edilebilir uygulama arasındadır [92, 94].



Şekil 1.11: Dijital ışık işleme 3B yazıcısı [92, 94].

1.2.6 3B Yazıcıların uygulama alanlarına kazandırdıkları

Çizelge 1.1'de 3B yazıcıların geleneksel üretime göre kazandırdığı özellikler verilmiştir. Çizelge 1.2'de ise endüstride 3B teknolojinin kullanıldığı uygulamalar verilmiştir.

Çizelge 1.1: 3B yazıcıların geleneksel üretime göre kazandırdığı özellikler [95, 96].

Uygulama Alanları	Avantajlar
Hızlı Prototipleme	• Prototip oluşturmayı hızlandırarak pazara sunma süresini kısaltır. • Ürün geliştirmeyle ilgili maliyeti azaltır. • Şirketleri inovasyonda daha verimli ve rekabetçi kılar.
Yedek Parça Üretimi	• Onarım sürelerini azaltır. • İşçilik maliyetini azaltır. • Maliyetli depolamadan kaçınmayı sağlar.
Küçük Hacimli İmalat	• Küçük partileri maliyet etkin bir şekilde üretebilir. • Takımlama yatırımını ortadan kaldırır.
Özelleştirilmiş Benzersiz Öğeler	• Düşük maliyetle toplu özelleştirmeyi etkinleştirir. • Tam ve özelleştirilmiş yedek parçaların yerinde hızlı üretimi sağlar.
Karmaşık Parçalar	• Düşük maliyetle çok karmaşık parça üretimi sağlar.
Takım Tezgahı İmalatı	• İşçilik maliyetini azaltır. • Maliyetli depolamayı önler. • Düşük maliyetle müşteriye özel üretim sağlar.
Hızlı İmalat	• Doğrudan bitmiş bileşenlerin üretimi. • Az sayıda parçanın nispeten ucuz üretimi.
Bileşen İmalatı	• Düşük maliyetle müşteriye özel üretim olanağı sağlar. • Kaliteyi arttır. • Tedarik zincirini kısaltır. • Geliştirmeye dahil olan maliyeti azaltır. • Fazla parçaları ortadan kaldırmaya yardımcı olur.
Yerinde ve Müşteri İsteğine Bağlı İmalat Özelleştirilmiş Yedek Parçalar	• Depolama ve nakliye maliyetlerini ortadan kaldırır. • Arıza sürelerini önleyerek paradan tasarruf ettirir. • Onarım maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. • Tedarik zincirini kısaltır. • Büyük envanter ihtiyacını azalır. • Ürün yaşam döngüsü avantajına izin verir.
Hızlı Onarım	• Onarım süresinde önemli azalma olur. • Onarılan bileşenleri en son tasarıma değiştirme fırsatı sağlar.

Çizelge 1.2: Endüstride 3B teknolojinin kullanıldığı uygulamalar [95, 96].

Endüstri	Uygulamalar	Kazandırılan Özellikler
Havacılık	• Prototipleme • Bileşen üretimi • Uçak ağırlığının azaltılması • Airbus için motor bileşenleri • Uçuş sertifikalı donanım • Uydu imalatı • Bileşenler	• Düşük maliyetle çok karmaşık iş parçaları üretin. • Ürün yaşam döngüsü avantajına izin verin. • Uzak yerlerde üretilen nesneler, mal teslimi olarak artık bir kısıtlama değildir. • Teslim süresinde bir azalma, envanterde bir azalma ve maliyetlerde bir azalma anlamına gelir. • Astronotlar için isteğe bağlı üretim. • Sürtünmeye neden olan fazla parçaları ortadan kaldırın ve ağırlık ekleyin.
Otomotiv	• Prototipleme • Bileşen üretimi • Araç ağırlığının azaltılması • Yarış arabası için soğutma sistemi	• Fazla parçaları ortadan kaldırmaya yardımcı olun. • Pazara çıkış süresini hızlandırın. • Ürün geliştirmeyle ilgili maliyeti azaltın. • Onarım maliyetlerini önemli ölçüde azaltın. • Arabaların gelecekte nasıl görüneceğini ve işlev göreceğini etkili bir şekilde değiştirebilir.
Takım Tezgahı Üretimi	• Prototipleme • Kavrama sistemi ağırlığının azaltılması • Akıllı paketleme için kol	• Tam ve özelleştirilmiş yedek parçaların yerinde hızlı üretimi. • Daha verimli ve daha hafif tasarımlara izin verin.
Sağlık ve Tıp	• İşitme cihazları ve protezler gibi özel implantların imalatı • İnsan organları üretmek • Kemiklerin, vücut parçalarının yeniden yapılandırılması.	• Azaltılmış ameliyat süresi ve maliyeti. • Ameliyat sonrası komplikasyon riskini azaltır. • Azaltılmış teslim süresi.
Diş Hekimliği	• dişle başa çıkma • Tam olarak uyarlanmış dişler ve diş kronları • Diş ve ortodontik aletler	• Yeni malzemelerin kullanımında büyük potansiyel. • Azaltılmış teslim süresi.

Çizelge 1.2 (devam): Endüstride 3B teknolojinin kullanıldığı uygulamalar [95, 96].

Endüstri	Uygulamalar	Kazandırılan Özellikler
Mimari ve İnşaat	• Binanın tam ölçekli bir modelinin oluşturulması • Gövde bileşenlerini yazdırma	• %60'a kadar daha hafif ölçekli modeller üretmek. • Üretimin teslim sürelerini %50-80 oranında azaltın. • Bir modeli gözden geçirme yeteneği, yeniden çalışmanın neden olduğu değerli zamandan ve paradan tasarruf sağlar. • İnşaat süresini ve insan gücünü azaltın. • Özelleştirmeyi artırın. • İnşaat maliyetini azaltın, yoksulluk çeken bölgelere düşük maliyetli konut sağlayın.
Perakende/ Giyim	• Ayakkabı ve giyim • Moda ve tüketim malları • Tüketici sınıfı gözlük • Titanyum gözlük çerçeveleri • Dayanıklı plastik ve metal bisiklet aksesuarları üretimi	• İsteğe bağlı özel uyum ve stil. • Tedarik zinciri maliyetlerini azaltın. • Ürünleri küçük miktarlarda gerçek zamanlı olarak oluşturun ve teslim edin. • Genel olarak daha iyi ürünler oluşturun. • Ürünler pazara daha hızlı ulaşır.
Gıda	• Çikolata ve şeker • Kraker, makarna ve pizza gibi yassı yiyecekler	• Yiyecekleri katman katman 3 boyutlu nesnelere sıkıştırma yeteneği. • Maliyeti azaltımı

1.3 FDM'de Kullanılan Polimerler

Eklemeli imalat prosesinde polimerler; kompozitler, nanokompozitler, hibrit malzemeler, sürekli ve süreksiz fiber takviyeli termoplastikleri içeren farklı bileşim ve formlardaki çeşitli malzemeleri kullanarak gerçekleştirmektedir. FDM 3B baskı yönteminde kullanılan polimerler akrilonitril bütadien stiren (ABS), polietilenglikol (PETG), poliariletereterketon (PEEK), polikarbonat (PC), polilaktik asit (PLA), Nylon 12/karbon fiber, yüksek darbe dirençli polistiren, termoplastik poliüretan (TPU), akrilonitril stiren akrilat (ASA), polieterimid (PEI) olarak literatürde yer almaktadır [97].

FDM üretim teknolojisinde kullanılan en yaygın termoplastik polimer malzemeler akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktit (PLA), polietilenglikol (PETG) poliamid (Naylon), naylon 12, polikarbonat (PC), cam dolgulu naylon ve epoksi reçinedir [97].

Son zamanlarda eklemeli imalat prosesi FDM 3B baskı yöntemi havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik,mobilya, spor, medikal, fikstür ve prototip gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu kullanımlar literatür haricinde büyük şirketler tarafından da tercih edilmektedir [98].

NASA, FDM teknolojisiyle ABS ve PC polimerlerini kullanarak Mars arazisinde kullanılabilecek dayanıma sahip karmaşık şekiller üretmektedir [98].

Ducati marka motorsiklet firması, yaşadıkları tasarım döngüsünü azaltmayı hedefleyerek yeni ürünlerinin pazara giriş süresini kısaltmıştır. ABS, PC ve PPS polimerlerini kullanarak hem konsept tasarım hem de prototip üretimi sırasında FDM teknolojisinden yararlanmaktadır [98].

Poli(laktik asit) (PLA), biyobozunur termoplastik malzemele olarak otomotiv, bilgisayar, gıda, oyuncak, elektrikli aletler ve medikal alanlar olmak üzere çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. PLA son zamanlarda endüstri ve akademik çalışmalar başta olmak üzere en umut verici biyobozunur polimerlerden birisidir. 3B yazıcıların gelişerek her alanda yaygınlaşması ve PLA' nın kolaylıkla işlenebilir olması sebebiyle literatür çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır [99, 100].

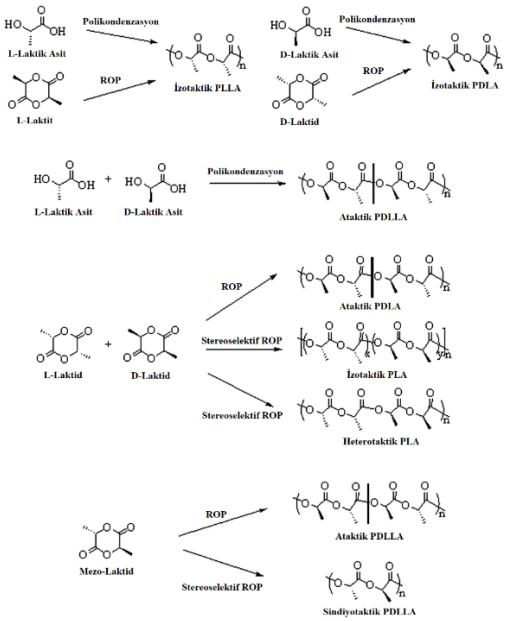
PLA, çok sayıda işleme tekniği ve büyük ölçekli üretimden dolayı pazarda geniş bir paya sahiptir. Diğer polimerler malzemelere göre nispeten ucuzdur ve çeşitli uygulamalarda kullanımı dikkat çekicidir [99, 100].

1845 yılında Théophile-Jules Pelouze'nin ilk olarak laktik asidin polikondenzasyonu ile poli(laktik asit) (PLA) sentezlediği bilinmektedir [101]. Wallace Hume Carothers ve arkadaşları 1932 yılında laktik asidi polimerize etmek için bir yöntem geliştirmiştir [102]. Ardından bu yöntem Du Pont tarafından daha yüksek moleküler ağırlıklı PLA elde ettiğini duyurmuş ve 1954 yılında patentini almıştır [102].

PLA sentezi, laktik asit üretiminden başlar ve polimerizasyon tamamlanana kadar birçok aşamadan geçen süreçtir [103, 104]. PLA polimeri genellikle iki ana yoldan sentezlenmektedir. Bunlar laktik asidin doğrudan polikondenzasyonu ve laktidin halka açma polimerizasyonu (ROP) olarak bilinmektedir. Endüstride PLA sentezi için ikinci yöntem daha sık kullanılır. 1992 yılında Cargill tarafından yüksek moleküler ağırlıklı

PLA elde etmek için laktidin halka açma polimerizasyonunu keşfederek patenti alınmıştır . Optik olarak L- ve D- laktitlerin polimerizasyonu sonucunda sırasıyla Poli(L- laktik asit) (PLLA) ve Poli(D-laktik asit) (PDLA) izotaktik homopolimerler elde edilebilir. Hem PLLA, hem de PDLA kristaldir ve 180 °C civarında bir erime sıcaklığı (T_m) değeri gösterir. PLLA ve PDLA' nın kristalliği ile birlikte erime sıcaklığı (T_m) genel olarak laktat birimlerinin optik saflığına bağlı olarak azaldıkça azalır. Optik olarak aktif olmayan poli(DL-laktid), rac- ve mezo- laktitlerden hazırlanan ataktik L ve D birimlerine sahip diziler amorf polimerlerdir. Her iki dizi, L ve D birimlerinde stereo-düzenli olarak kontrol edildiğinde kristal yapı elde edilebilir. Eğer izotaktik PDLA ve PLLA 1:1 oranında karıştırıldığında PLLA'nın erime sıcaklığının (T_m), PDLA'dan 50 °C daha yüksek olan stereo-kompleks kristaller (sc-PLA) verdiği bilinmektedir [105]. sc-PLA, zıt duyulara sahip sarmal makromoleküler zincirlerin birlikte kristalleştirilmesiyle oluşturulur. İzotaktik PLLA ve PDLA dizilerinden oluşan stereo-blok kopolimerler (sb-PLA), blok kopolimerizasyonunu içeren stereo-düzenli polimerizasyon teknikleriyle de sentezlenebilir [105, 106].

Ek olarak laktik asit zincir uzunluğunu artırmak için harici birleştirme ajanları kullanılmazsa, düşük moleküler ağırlıklı ve kırılgan yapıda polimer elde edilebilir. Ayrıca literatüre bakıldığında, laktik asidin azeotropik dehidratif yoğunlaştırılmasıyla zincirler uzatılarak yüksek moleküler ağırlıklı PLA sentezlenebilir [107]. Şekil 1.12'de PLA polimerizasyonu verilmiştir. Çizelge 1.13' te PLA özellikleri verilmiştir.



Şekil 1.12: PLA polimerizasyonu [107].

Çizelge 1.3: Poli(laktik asit) (PLA) özellikleri [108]

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (23 °C)	1,24 – 1,26 g/cm^3
Çekme mukavemeti	16-114 MPa
Kopma uzaması	%0,5-430
Elastisite modülü	0,230-13,8 GPa
Camsı geçiş noktası	56,6-57,7
Erime Noktası	120-170 °C
Çalışma Sıcaklığı	200–220 °C

Avantajlar:

- PLA, 3B yazıcılarda gerçekleştirilen çalışmalarda en çok tercih edilen malzemedir.
- PLA, çevre dostu bir biyoplastik termoplastik polimerdir. Geri dönüştürülerek tekrar kullanılabilir.
- Mısır nişastası, şeker kamışı, buğday veya pirinçten elde edilir.
- Üretiminde karbondioksit tüketir.
- Biyouyumlu olduğu için medikal uygulamalarda ilgi çekici malzemedir.
- Piyasada çok çeşit renk skalası mevcuttur.
- 3B yazıcılarla kolay baskılanabilir.
- Tabla üzerinde katman yapışması daha kolaydır.
- Parlak yüzeyler elde edilebilir.
- Çarpılma oranı düşüktür.
- Asetonla çözünme zordur.
- Ekstrüzyon sırasında zararlı gaz salmaz. Kokusuzdur [96] [109, 110].

Dezavantajlar:

- 60 °C' ye kadar düşük sıcaklık dayanımına sahiptir.
- Zayıf tokluk. PLA, kopmada %10' dan daha az uzama olan çok kırılgan bir malzemedir.
- Yavaş bozunur (3-5 yıl kadar).
- Hidrofobiktir. Nem absorbe edebilir. Bu yüzden vakumlu ve karanlık özel saklama koşullarına ihtiyaç duyar.

- Kimyasal olarak inerttir ve reaktif yan zincir grupları bulunmadığı için modifikasyonu zordur [109].

Bu çalışmada PLA polimerinin kullanımı tercih edilmiştir. Tercih edilmesinin en temel nedeni ise PLA malzemesinin 3B yazıcılarda kolaylıkla baskı alabilme kabiliyetidir. PLA polimeri hem açık hem de kapalı 3B yazılılarda üretilebilirken, diğer yaygın kullanılan ABS ve HIPS polimerleri sadece ortam sıcaklığı kontrol altında tutulabilen kapalı yazıcılarda basılmaktadır. Açık tablaya sahip 3B yazıcılarda ABS ve HIPS gibi polimerlerden baskı almak zordur.

PLA polimerinin tercih edilme sebeplerinden bir diğeri ise diğer polimerlere göre tablaya iyi yapışma ve düşük çarpılma özelliğine sahip olmasıdır. Üretilen her numune tablaya mükemmel şekilde yapışmış ve ek bir yapıştırıcı desteği kullanılmamıştır. Test edilen tüm numunelerin boyutları kontrol edilmiş ve hepsi aynı ölçülerde basılmıştır. Hiçbir çarpılma durumu gözlemlenmemiştir.

PLA dünyada en yaygın kullanılan 3B baskı malzemesidir. Çalışma kapsamında diğer yaygın polimerler de incelendiğinde belirli dönemlerde filament pazarında diğer polimerlerden üretilen filamentlerin stoklarda kalmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple PLA polimerinden üretilen filamentler, diğer polimerlerden üretilen filamentlere göre daha düşük maliyetli ve daha ulaşılabilir durumdadır.

Çalışma sürecinde tek tip polimer tercih edilerek üç farklı tasarım gerçekleştirilmiş, üretilmiş ve kendi arasında incelenmiştir. Elde edilen veriler tasarımların davranışına göre elde edilmiştir.

1.4 Oksetik (Auxetic) Malzemeler

Akıllı malzemelere olan talep gün güne artmaktadır. Bu yüzden son zamanlarda yeni ve çok amaçlı malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bu malzemelerin geliştirilmesi veya mevcut malzemelere yeni özelliklerin eklenmesi akıllı malzeme üretmenin adımlarındandır [111]. Akıllı malzemeler günümüzde tekstil, uzay, havacılık, savunma, biyomedikal, spor, sensör, aktüatör, polimer, seramik ve kompozit malzemeler gibi birçok uygulamanın gelişimine olanak sağlamaktadır [112].

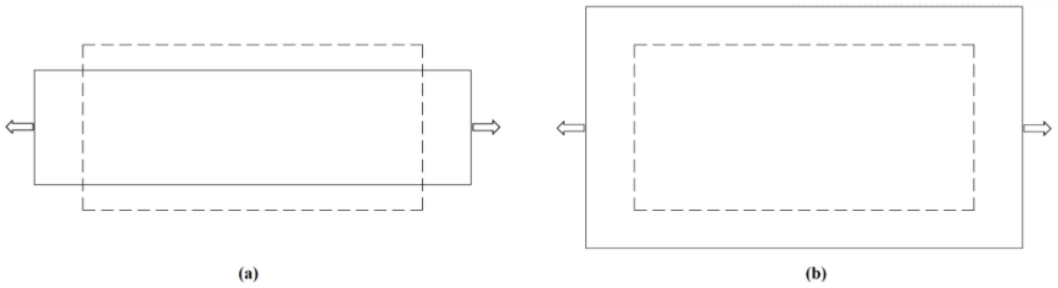
Yeni yüzyılda akıllı malzemeler arasında oksetik (auxetic) malzemeler literatürde yer almaktadır. Doğada kullanılan birçok malzeme pozitif Poisson oranına sahiptir. Fakat bunların kısıtlı sayısı malzeme negatif Poisson oranına sahiptir [113].

Poisson oranı mühendislik biliminde malzemelerin davranış ve yapısı hakkında bilgi vermektedir. İlk olarak Fransız bilim insanı Simeon Denis Poisson tarafınca ortaya sürülmüştür. Poisson oranı; kuvvet uygulanan malzemedeki, kuvvet yönündeki kısalma miktarı ile diğer yöndeki uzama miktarı arasındaki orandır. Poisson oranı için izotropik malzemelerde verilen değer -1 ile 0.5 arasındadır. Çizelge 1.4'te doğada yaygın bulunan malzemelerin Poisson değerleri verilmiştir [111, 114].

Çizelge 1.4: Doğada yaygın kullanılan bazı malzemelerin Poisson oranları [111, 114].

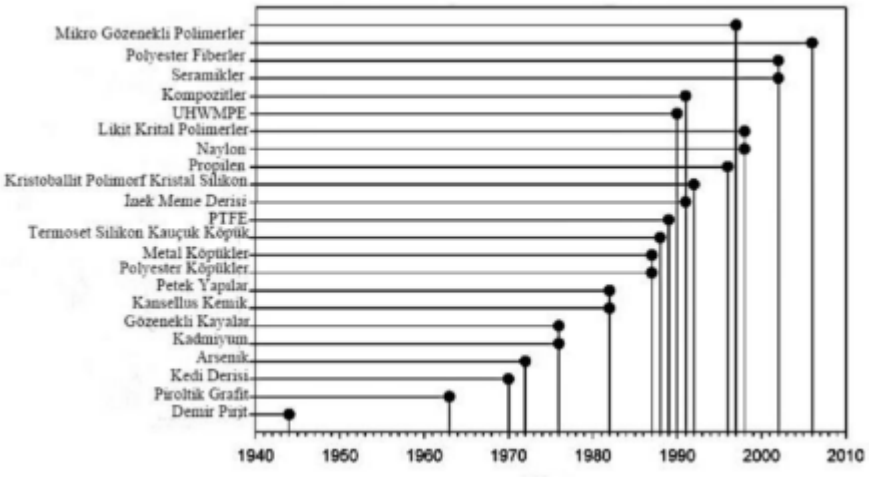
Malzeme	Poisson Oranı
Alüminyum	0,334
Bakır	0,355
Bronz	0,140
Buz	0,330
Beton (Yüksek performanslı)	0,13-0,16
Cam	0,240
Çelik (Yumuşak)	0,27-0,30
Çelik (Yüksek dayanımlı)	0,30
Epoksi reçine	0,38-0,40
Gümüş	0,37
Kauçuk	0,48-0,50
Naylon	0,40
Kükürt	0,21-0,34
Polistiren	0,340
Porselen	0,208
PVC	0,35
Teflon	0,399
Şişe mantarı	0
Seramik	0,290

Negatif Poisson oranına sahip malzemelerin sayısı doğada sınırlıdır. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler oksetik (auxetic) malzeme olarak da adlandırılmaktadır. Oksetik malzemeler, geleneksel malzemelere göre zıt yönde davranış sergilemektedir. Oksetik malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin aksine uygulanan kuvvet yönünde gerildikçe genişler ve basıldıkça ise daralırlar. Şekil 1.13'te şematize edilmiştir.



Şekil 1.13: (a) Geleneksel malzeme, (b) Auxetic malzeme.

1991 yılında Ken Evans tarafından ilk olarak bu terim kullanılmıştır [115]. Fakat negatif Poisson oranına sahip malzemelerin mantığı literatürde 1987 yılında Rod Lakes tarafından Science dergisinde bahsedilmiştir [116]. Oksetik malzemelerin tarihsel gelişim ve keşif kronolojisi Şekil 1.14'te gösterilmiştir [117].



Şekil 1.14: Oksetik malzemelerin tarihsel gelişim ve keşif çizelgesi [117].

Negatif Poisson oranına sahip oksetik malzemeler, pozitif Poisson oranına sahip diğer malzemelere göre karşılaştırıldığında önemli avantajlara sahiptir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [116, 118].

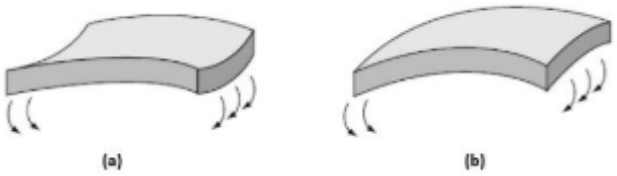
- Akustik davranış
- Daha iyi sürtünme dayanımı
- Darbe ve ultrasonik etkilerine karşı üstün enerji emme kabiliyeti
- Arayüzey/matris dayanımı
- Isıl darbe dayanımı
- Üstün kopma dayanımı

- Üstün kayma modülü
- Artan düzlemsel gerinim direnci
- Kontrol edilebilir gözeneklilik geçirgenliği
- Kubbe şeklinde (senklastik) bükme

Oksetik malzemeler; havacılık, uzay, savunma, otomotiv, tekstil, teknik tekstil, ayakkabı, medikal gibi birçok endüstride kullanılmaktadır [119].

1.4.1 Sinklastik davranış

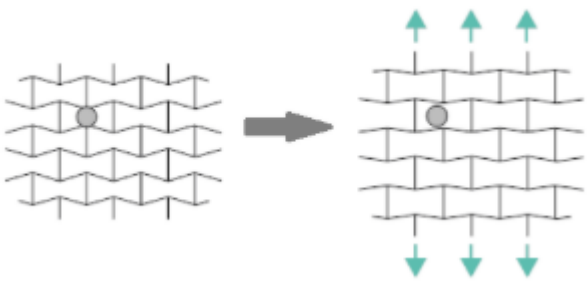
Sinklastik davranış, bir malzemeye uygulanan kuvvet etkisiyle kubbe formunda deforme olması olarak tanımlanabilir. Malzemeye kuvvet uygulandığında gerilmeye maruz kalmaktadır. Oksetik malzemeler uzatıldığında ise malzemenin genişlemesi ve sıkıştırılmış bölgenin daralması sonucunda kubbe oluşmaktadır. İlgili davranış Şekil 1.15'te gösterilmiştir [116, 118].



Şekil 1.15: (a) Auxetic olmayan ve (b) auxetic malzemelerin eğrilikleri [116, 118].

1.4.2 Değişken geçirgenlik

Oksetik malzemelerde malzemenin geçirgenliği kontrol etmek önemlidir. Bu malzemelere belirli bir yönde yük uygulandığında genişlemeden kaynaklı gözeneklerin boyutu artmaktadır. Böylece kuvvete maruz kaldıklarında malzeme daha geçirgen hale gelmektedir [116, 118]. Değişken geçirgenlik davranışı Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



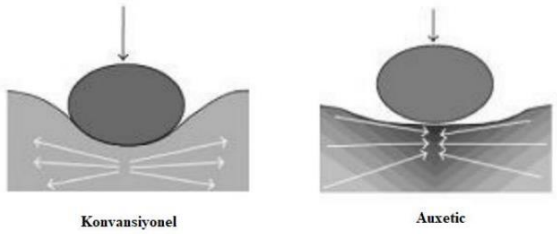
Şekil 1.16: Yeniden girintili desen yapısında değişken geçirgenliği [116, 118].

1.4.3 Kesme modülü

Malzemenin bir tarafı sabitken diğer tarafı paralel bir yüke maruz kaldığında meydana gelen deformasyonu belirlemek için kesme modülü incelenmektedir [116, 118].

1.4.4 Girinti modülü ve enerji absorbe etme

Kuvvet uygulandığında basıncı azaltmak için kuvveti malzeme üzerinde dağıtmaktadır. Oksetik malzemede yüke maruz kalındığında sıkıştığı ve yüksek yoğunluklu bölgelere sahip olduğundan girinti modülü direncinde artış gözlemlenir [116, 118]. Şekil 1.17'de girintili modül ve enerji absorbe etme davranışı gösterilmiştir.



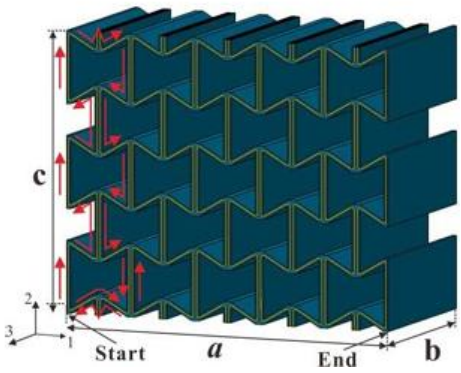
Şekil 1.17: Geleneksel ve oksetik malzemelere yük uygulandığındaki davranış [116].

1.4.5 Kırılma tokluğu

Malzemede oluşan çatlağın yayılması için yeterli enerjidir. Oksetik malzemelerde bir çatlapın yayılması için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulduğu ve Poisson oranı değiştikçe direncin değişebileceği bildirilmiştir. Poisson oranı -1'e yaklaştıkça malzeme daha da sertleşeceği literatürde bahsedilmiştir. [116, 118].

1.5 Literatür Araştırması

Quan ve ekibi, sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozit oksetik petek yapısını, 3B baskı teknolojisini kullanarak üretmeyi hedeflemiştir. Karşılaştırma amacıyla saf polilaktik asit (PLA) yapısı da üretilmiştir. Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak Kevlar R fiber (145 dtex doğrusal yoğunluğa ve 1440 kg/m^3 yoğunluğa sahip) ve polilaktik asit (PLA/1,75 mm, yoğunluk 1240 kg/m^3) kullanılmıştır. Termoplastik malzeme olarak FLASHFORGE filament kullanılmıştır. Şekil 1.18'de gösterildiği gibi, sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozit oksetik petek numuneleri Çizelge 1.5'te olduğu gibi geometrik boyutlara sahip 5x3 birim hücreleri kullanılarak üretilmiştir [120].

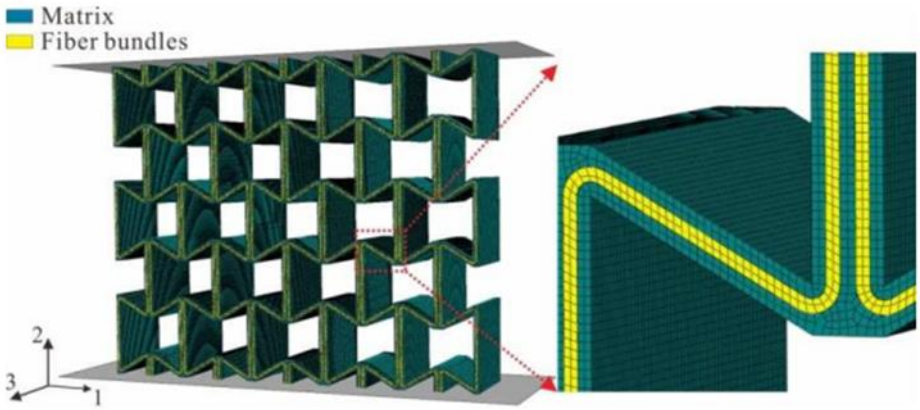


Şekil 1.18: Hücresel yapının basılma yönü [120].

Çizelge 1.5: 3B baskılı peteklerin geometrik parametreleri (birim: mm) [120].

h	l	t_1	t_2	t_m	t_{m1}	t_f	θ	a	b	c
20,52	8,45	2,36	1,38	0,46	0,52	0,46	30°	96,80	50,00	79,34

3B yazdırma işlemi sırasında yazdırma parametreleri 0,2 mm katman kalınlığı, 100 mm/dak yazdırma hızı, 210 °C nozzle sıcaklığı belirlenmiştir. Tasarlanan yapı sonlu eleman modelleme karbon fiber takviyeli polimer kompozit oksetik peteklerinin düzlem içi sıkıştırma davranışları, ticari FE yazılım paketinin açık sürümü olan ABAQUS kullanılarak modellenmiştir. Petek yapısı, Şekil 1.19'da gösterildiği gibi test makinesinin merdanelerini simüle eden iki sert yüzey arasına sıkıştırılmıştır. Hem küçük hem de büyük deformasyonları taklit etmek için, fiber demetini ve saf matris parçalarını ayrı ayrı hesaba katan, yazdırma yolu tabanlı bir FE modeli geliştirilmiştir.



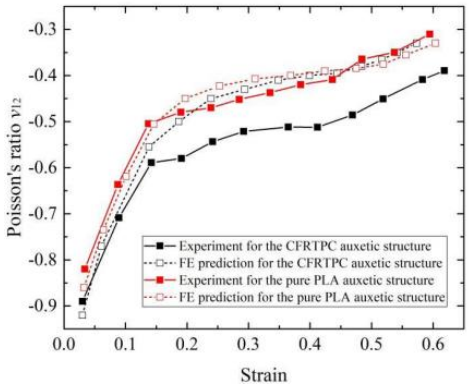
Şekil 1.19: 2 yönde sıkıştırmaya yönelik FE modelinin ayrıntıları [120].

Şekil 1.20' de hem karbon fiber takviyeli polimer kompozit hem de saf PLA oksetik petekler için FE'nin öngördüğü nominal sıkıştırma gerilmesi-gerinim tepkilerini, 1 yönü boyunca sıkıştırma yüklemesi uygulandığında yapılan deneysel ölçümlerle karşılaştırmıştır. Yanıt eğrisindeki numaralandırılmış madde işaretleyicilerine karşılık gelen deformasyon mekanizmaları Şekil 1.20'de gösterilmiştir. Genel olarak, deneyler

ve simülasyonlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır ve mevcut FE modellemesinin aslına uygunluğu doğrulanmıştır [120].

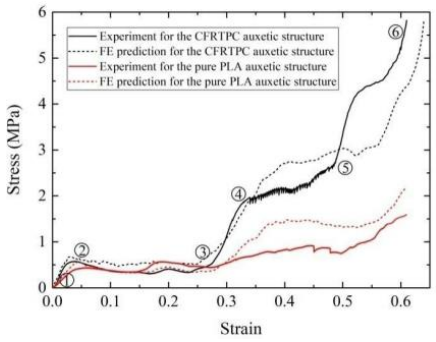
1 yönü boyunca düzlem içi sıkıştırma altında, yardımcı bal peteğinin düzgün doğrusal ve küçük elastik deformasyonu konfigürasyon 1'den başlamıştır. Şekil 1.20'deki ilk gerilim zirvesine konfigürasyon 2'de ulaşılmış, devamını ani bir düşüş takip etmiştir. Böylece bu durum desteklerin dengesizliğine ve baskı kusurlarına atfedilmiştir. Yapı 2'den 3'e daha da sıkıştırıldıkça deformasyon, küçük dalgalanmalarla kısa bir gerilim platosuna karşılık gelen, dönen eğimli destekler şeklinde kademeli olarak lokalize oluğunu yansıtmaktadır. 3'ten 5'e kadar, asimetrik bir şekilde katman katman oluşan lokal yoğunlaşmalar gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, Şekil 1.20'de gösterildiği gibi nominal gerilim bazı dalgalanmalarla artmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer kompozit oksetik petek konfigürasyon 6'ya sıkıştırıldığında, gerilim-gerinim eğrisindeki maksimum gerilime karşılık gelen tüm yapının yoğunlaşması sağlanmıştır [120].

Şekil 1.20’de 1 yönü boyunca yüklendiğinde hem karbon fiber takviyeli polimer kompozit hem de saf PLA oksetik petekleri için nominal gerinimin bir fonksiyonu olarak Poisson oranı ν12'yi çizmiştir. Poisson oranı artan basınç gerinimi ile arttı. Tüm yükleme süreci boyunca oksetik petek, saf PLA yapısından daha küçük olan negatif bir Poisson oranı sergilemiştir [120].



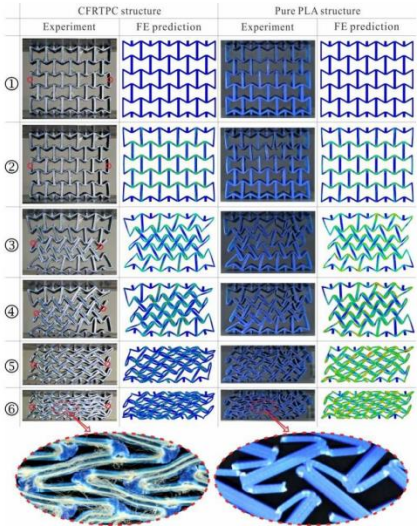
Şekil 1.20: 1 yönlü sıkıştırma altında Poisson oranı ve gerinim tepkileri [120].

Şekil 1.21’de hem CFRTPC'nin hem de saf PLA yardımcı peteklerinin sayısal olarak tahmin edilen nominal basınç gerilimi-gerinim tepkilerini, 2 yönü boyunca yükleme durumu için deneysel ölçümlerle karşılaştırmıştır [120].



Şekil 1.21: 2 yönlü sıkıştırma altında gerilim-gerinim grafiği [120].

Tepki eğrisi üzerindeki numaralandırılmış madde işaretleyicilerine karşılık gelen deformasyon mekanizmaları Şekil 1.22'de gösterilmiştir. Yine deneyler ve FE tahminleri arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Yapı konfigürasyon 2'den 3'e sıkıştırıldığında, aynı sıranın dikey payandaları aynı yönde dönerken bitişik sıralar zıt yönlerde döndürülerek uzun bir gerilim platosu ortaya çıkmıştır. 3'ten 5'e kadar, bitişik sıraların dikey payandaları kademeli olarak birbirleriyle temasa geçerek yukarı doğru bir gerilim yörüngesine yol açmıştır. Matriste 4'ten 5'e kadar çok sayıda çatlak oluşmuştur. 1 yönlü sıkıştırma durumundan farklı olarak gerilim, tüm süreç boyunca çoklu plato etkisi sergilemiştir. Saf PLA yapısı için, nominal gerinim 0,45'e ulaştığında payandalar kırıldı ve bu da taşıma kapasitesinde ani bir düşüşe neden oldu. Buna karşılık, sürekli fiberler, her bağ için matristeki çatlakların yayılmasını etkili bir şekilde engellemiştir. Böylece Şekil 1.22'de gösterildiği gibi desteklerin kırılması ve yapının ezilmesi önlenmiştir [120].



Şekil 1.22: 1 yönlü düzlem içi sıkıştırmaya maruz kalan PLA yapı [120].

Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı, saf PLA yapısına kıyasla düzlem içi mekanik özellikler açısından önemli avantajlar sergiledi. Sürekli liflerin eklenmesiyle

kütle yalnızca %6 arttı ancak Poisson oranı azalmıştır; ayrıca, 1 yönlü basınç sertliği, 2 yönlü basınç sertliği, 1 yönlü enerji emilimi ve 2 yönlü enerji emilimi sırasıyla %98,7, %86,3, %87 ve %100 oranında önemli ölçüde artırıldı [120].

Sonuç olarak bu çalışma, karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik petek yapılarının 3B baskı teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, hızlı bir şekilde üretildiğini göstermekte ve uygun bir tek vuruşlu baskı yolu planlaması geliştirilmiştir.

Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik peteklerinin düzlem içi basınç davranışlarını araştırmak için deneysel, analitik ve sayısal bir yaklaşım kullanılmıştır.

Ana bulgular şu şekilde özetlenmiştir: (1) Baskı yoluna dayalı analitik model ve FE yöntemi, hem fiber demetini hem de saf matris parçalarını hesaba katmıştır ve dolayısıyla 3D baskılı sürekli FRCLS'lerin tasarımı için güvenilir olduğu bildirilmiştir.

(2) Saf PLA yapılarının aksine, Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik petekleri daha küçük Poisson oranlarına sahiptir. 1 yönlü basınç sertliğinde, 2 yönlü basınç sertliğinde, 1 yönlü enerji emiliminde ve 2 yönlü enerji emiliminde sırasıyla %98,7, %86,3, %87 ve %100 çarpıcı bir artış sergilemiş, ayrıca kütle yalnızca %6 artmıştır [120].

(3) Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik petekleri için sürekli fiberler, matristeki çatlakların yayılmasını etkili bir şekilde engellemiş ve bu da desteklerin kırılmasını ve tüm yapının ezilmesini önlemiştir. Bunun aksine, saf PLA yapıları için destekler zamanından önce kırılmış ve bu da yükte ani bir düşüşe yol açmıştır [120].

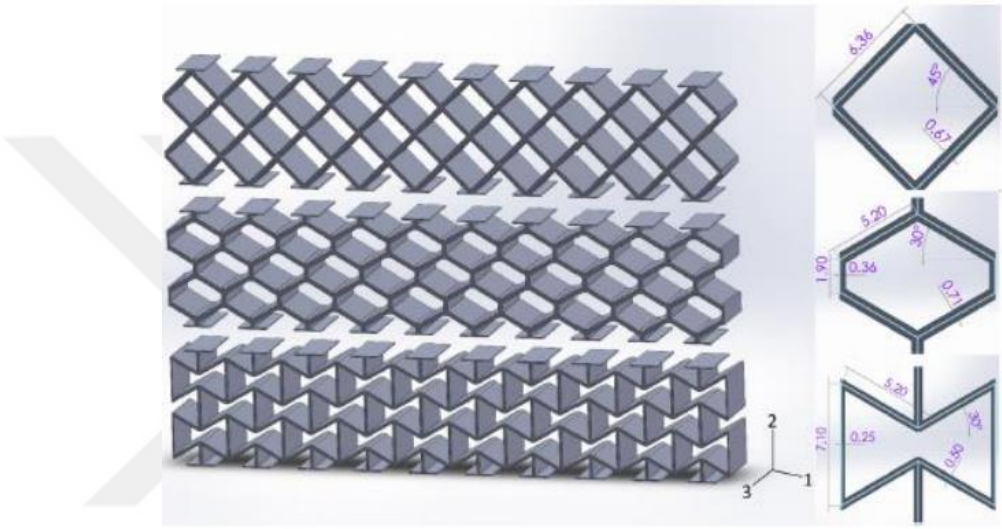
(4) Düzlem içi mekanik özelliklerin büyük varyasyonları ve kontrolü, Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik petekleri için birim hücre geometrik parametrelerinin değiştirilmesiyle uyarlanabilir [120].

(5) Karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapısı oksetik peteklerinin mekanik özellikleri, fiber içeriğinin arttırılması ve baskı kusurlarının azaltılmasıyla daha da geliştirilebilir olduğu bildirilmiştir [120].

Hou ve çalışma arkadaşları, oksetik (yeniden giren petek) ve oksetik olmayan (elmas kafes ve geleneksel petek) kafes kompozitlerin güvenilirliği üzerine karşılaştırmalı bir çalışma sunmaktadır. Analiz edilen örnek, iki adet tek yönlü karbon fiber takviyeli kompozit yüzey tabakasından ve 3B baskılı polimerik çekirdekten oluşmaktadır. Birim

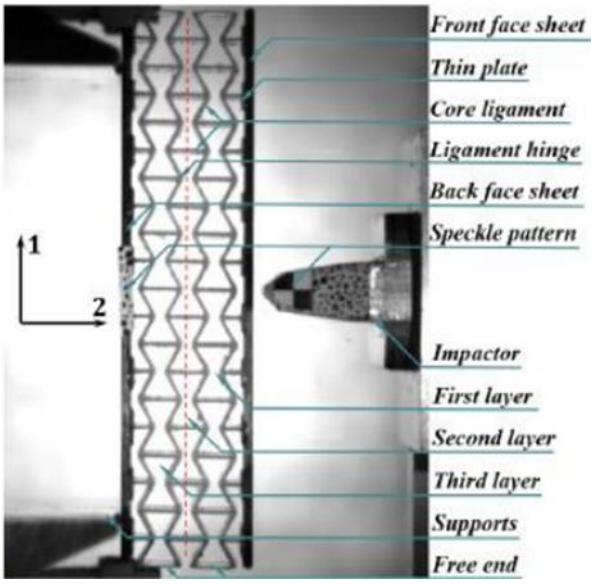
hücre deformasyon modelini karakterize etmek için ilk olarak düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiş ve bunun sandviç panel performansının yanı sıra çekirdek yapı davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır [121].

Bu nedenle 2 boyutlu topoloji seçilmiş ve hacim oranı %20 olarak ayarlanmıştır. Üç tip hücresel yapı, birim hücreyle aynı boyuta (9 mm x 9 mm) sahip olacak şekilde sabitlenmiştir. Bu yaklaşım, farklı birim hücre deformasyon modelinin daha basit bir şekilde gözlemlenmesini sağlamıştır. Şekil 1.23'te sandviç paneller için farklı tasarımlarda üretilen çekirdek yapılar ölçüleriyle birlikte gösterilmiştir [121].



Şekil 1.23: Farklı tasarımlarda üretilen çekirdek yapılar ve ölçüleri [121].

Şekil 1.24'te hazırlanmış sandviç paneli gösterilmiştir. Her numune epoksi yapıştırıcı DP420 (3M Scotch-Weld) ile yapıştırılarak birleştirilmiştir. Ön yüzey malzemesi olarak tek yönlü CFRP seçilmiş ve 1 yönünde hizalanmıştır. Tasarlanan çekirdek yapı, dijital malzeme FLX9795-DM ile 3 boyutlu yazıcı (Objet Connex260, Stratasys) kullanılarak üretilmiştir. Eklemeli üretimden kaynaklanan anizotropik yapının etkisini ortadan kaldırmak için tüm numuneler aynı yönelimde üretilmiş ve daha sonra kürlemenin doyması için en az yedi gün oda sıcaklığında bırakılmıştır [121].



Şekil 1.24: Sandviç panelin test sırasındaki görüntüsü [121].

Üretilen numunelere dinamik üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Sandviç panelin üç nokta eğme koşulunda tutulması için iki yumuşak fikstür kullanılmıştır. Açıklık 72 mm olarak ayarlanmıştır. Çarpma profilinin sandviç panel performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu çalışmada burun yarıçapı 3,2 mm olan yarım küre şeklindeki aparat seçilmiştir. Panel deformasyonunun sıkışma yerine bükülmesini sağlamakta ve çekirdek yapı deforme olmadan ön yüz sacının delinmesini önlemektedir. Bu büyük değer yalnızca 2 boyutlu deformasyon modelinin elde edilmesine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda kenar etkisini de ortadan kaldırmaktadır. Dahası, yapışanların kısıtlaması nedeniyle, çok katmanlı konfigürasyonla karşılaştırıldığında yalnızca ikinci katman aktif katman olarak kabul edilebileceği bildirilmiştir [121].

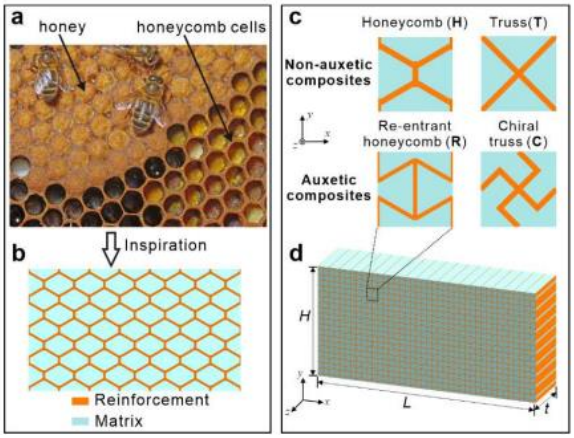
Oksetik ve oksetik olmayan kafes kompozitlerin güvenilirliğini araştırmak için dinamik üç nokta bükme testleri yapılmıştır. Testler incelendiğinde yeniden girişli topolojinin daha düşük enerji emme kapasitesi ancak üstün sağlamlık ve dayanıklılık sergilediği bulunmuştur. Sonuç olarak, yeniden giriş sandviç paneli, darbe enerjisinin uygun olması koşuluyla, hem kuvvet azaltmada hem de enerji dağıtımında en iyi performansı göstermektedir. Ayrıca, yeniden girişli çekirdeğin kullanılması, yalnızca darbe enerjisi arttıkça yüzey tabakasının nüfuz etmesini stabilize etmekle kalmaz, aynı zamanda sandviç panele çok döngülü darbeler altında tutarlı davranışlar kazandırmaktadır. Bu benzersiz performanslar, daha uyumlu deformasyon ve daha az stres konsantrasyonu sağlayan yardımcı yapının küresel dengesizliğinden

kaynaklanmaktadır. Ortaya çıkan tutarsızlıklar doğrulama için sandviç çekirdek deformasyonu ile yorumlanmaktadır. Bu bulgular, rasyonel tasarım ve 3 boyutlu baskının bir kombinasyonu yoluyla, özellikle döngüsel yükleme koşulları altında, yeni sınıf oksetik kafes kompozitlerin geliştirilmesinin önünü açmakta olduğu öngörülmüştür [121].

Li ve takım arkadaşları, oksetik malzemelerdeki elemanların hücresel yapısı ve bükülme deformasyonu doğası sebebiyle, genellikle nispeten düşük sertliğin ve enerji emiliminin aynı anda arzu edildiği sınırlı uygulamanın üstesinden gelebilmek için yüksek performanslı kompozitleri araştırmıştır. Statik ve dinamik deneysel testlerin yardımıyla 3B baskılı oksetik ve oksetik olmayan kompozit yapılar karşılaştırılmıştır.

İlk mekanizma, oksetik takviye malzemesinin negatif Poisson oranı etkisidir. Bu etki kompozit malzemedeki matrisi girinti ve darbe sırasında iki eksenli sıkıştırma durumunda ek destek sağlar. İkinci mekanizma ise genel kompozitlerin negatif Poisson oranı etkisidir. Bu durum oksetik takviyeli kompozit malzemeyi girinti bölgelerinde daha yoğun hale getirerek dirençli hale getirmektedir [122].

İlk olarak oksetik yapı tasarlanmıştır. Bu yapı tasarlanırken bal peteği tasarımından ilham alınmıştır. Şekil 1.25(a)'da gösterildiği gibi petek hücre modeli bulunmaktadır. Şekil 1.25(b)'de ise kafes takviyesi ve matrisi birleştiren doğal bal peteğinden ilham alınan yapı yer almaktadır. Bu çalışmada dört tip kafes takviyeli kompozit tasarlanmıştır. İlgili yapılar Şekil 1.25(c)'de incelendiği üzere petek tasarımı (H olarak etiketlenmiş), yeniden girişli petek tasarımı (R olarak etiketlenmiş) için açıları 120° ve 60° olarak tercih edilmiştir. Kiral kafes tasarımı (C olarak etikenlenmiş), kafes tasarımı (T olarak etiketlenmiş) için tüm çapraz desteklerin açıları 90° olarak belirlenmiştir. Çalışmada bir önceki yapılan çalışmaya atıfta bulunularak gerçekleştirilen basma testi sonuçlarına göre bal peteği takviyeli kompozit için başlangıç Poisson oranı 0,5' tir. Yeniden girişli petek takviyeli kompozit için Poisson oranı -0,5, kiral kafes takviyeli kompozit için Poisson oranı -0,3, kafes takviyeli kompozit için ise Poisson oranı 1 olarak bildirilmiştir [122].

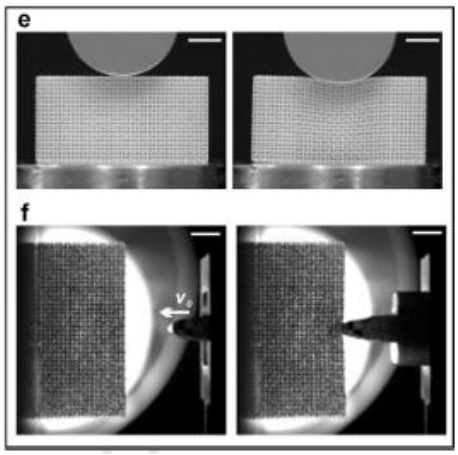


Şekil 1.25: (a) Bal petek. (b) Takviye-matris. (c) Hücre şekli. (d) Numune.

Tasarlanan yapılar çok malzemeli bir 3B yazıcı olan Objet Connex260 kullanılarak üretilmiştir. Üretim sırasında ışığa duyarlı iki polimerik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler akrilik bazlı fotopolimer (VeroWhite) ve yumuşak elastomerik malzeme (TangoPlus) olduğu bilinmektedir. Şeffaf yumuşak matris TangoPlus (Young modülü ~0,77 MPa) olarak ve daha sert kafes takviyesi VeroWhite (Young modülü ~1,5 GPa) olarak verilmiştir [122].

Şekil 1.25(d)'de gösterildiği gibi numuneler 20x106 birim hücreden oluşmaktadır. Numunenin yüksekliği 30 mm, uzunluğu 60 mm ve kalınlığı 20 mm'dir. Kullanılan malzemenin anizotropik etkisi sebebiyle numuneler aynı yönde üretilmiş ve kürlemenin belirli doygunluğa ulaşabilmesi için yedi gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir [122].

Şekil 1.26(e) ve 1.26(f)'de 3B baskılı kafes takviyeli kompozitlerin mekanik davranışlarını inceleyebilmek için girinti testi ve dinamik darbe testleri gerçekleştirildiği gösterilmiştir [122].

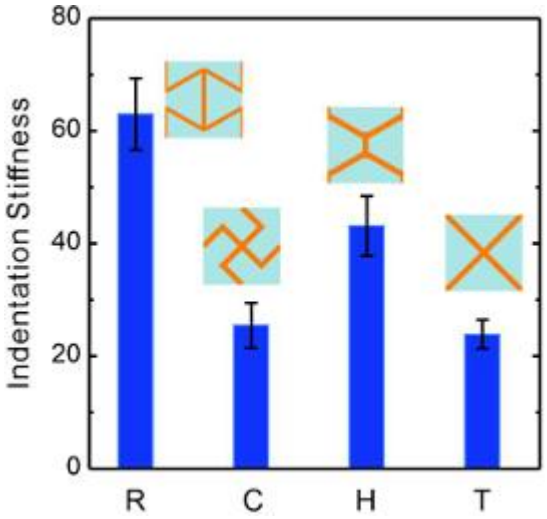


Şekil 1.26: (e) Darbe testi. (f) Girinti testi [122].

Kafes takviyeli kompozitlerin girinti testleri altındaki mekanik tepkisine ilişkin sayısal simülasyonlar, ticari sonlu elemanlar (FE) paketi ABAQUS/Standard (Simulia, Providence, RI) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm simülasyonlarda aynı boyuttaki deney numunelerine göre modeller kullanılmıştır. Yapının büyük deformasyonlarında hassas simülasyonun yapılabilmesi için geometrik ve malzemedeki doğrusal olmayan durumlar da dikkate alınmıştır. Sayısal simülasyonlarda izotropik bir malzeme modeli benimsenmiştir. Kurucu fazlar, sert faz olarak camsı bir polimer ve yumuşak matris olarak bir elastomer malzeme olarak alınmıştır. Camsı polimerin gerilim-gerinim davranışı, VeroWhite'ın gerçek gerilim-gerinim ilişkisinden aktarılan elastik-viskoplastik bir model kullanılarak yakalanmıştır. TangoPlus'ın elastomerik gerilim-gerinim davranışı, başlangıç kayma modülü 0,213 MPa ve kilitleme gerilimi 1,90 olan Arruda-Boyce hiperelastik modeline dayalı hiperelastik bir malzeme olarak modellenmiştir [122].

İlk olarak, yeniden girişli petek, kiral kafes, düzenli petek, kafes topolojisine sahip takviyeli kompozitlerin girinti davranışını deneysel bir bakış açısıyla incelenmiştir. Burada her kompozit tasarım için %20'lik aynı hacimsel takviye fazı oranı kullanılmıştır. Yeniden girişli petek takviyeli kompozitler diğer üç tasarıma göre belirgin bir üstünlük göstermiştir. Büyük girinti derinliklerinde bazı yapılarda yük düşüşleri görülmüştür. Bunun nedeni, yük altında tüm malzemenin düzlem dışı yönde çökmesidir [122].

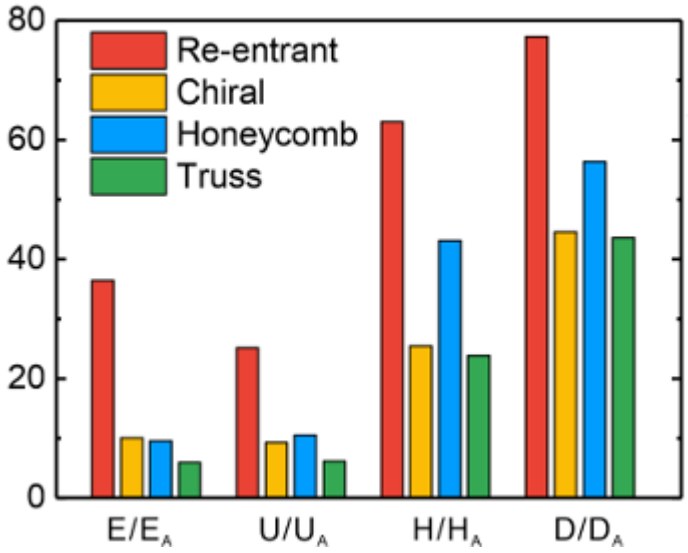
Şekil 1.27’ de gösterildiği üzere yeniden girişli petek tasarımlı kompozitlerin girinti sertliği, normal petek tasarımına sahip kompozitin 1,4 katı ve kiral kafes ile normal kafes takviyeli kompozitlerinden 2,5 katı daha iyi olduğu niceliksel olarak bildirilmiştir. Yeniden girişli petek kafes tasarımı negatif Poisson oranına sahip oksetik yapı olduğundan, kafes takviyeli kompozitlerin girinti direncini arttırmada oksetik kafes geometrisinin kullanılması avantajını açıkça göstermektedir [122].



Şekil 1.27: Farklı tasarımlardaki hücre modellerinin gerilim değerleri [122].

Oksetik kafes takviyeli kompozitlerin, oksetik olmayan kafes takviyeli kompozitlerle karşılaştırıldığında, kafes takviyesinin çeşitli hacim oranlarıyla arttırılmış girinti direnci sergiledikleri gösterilmiştir. Bu geliştirilmiş mekanik özellikler, kafes takviyesinin rasyonel yapısal tasarımı ile takviyeler ve matris aşamaları için malzeme seçimleriyle birleştirilebilir. Özellikle, oksetik takviyelerdeki negatif Poisson oranı, mekanik performansın alışılmadık kombinasyonu açısından çok önemlidir. Poisson oranının kafes takviyeli kompozitlerin girinti davranışı üzerindeki etkisini niceliksel olarak anlamak için, farklı kafes yapı tasarımlarıyla elde edilen farklı Poisson oranlarına sahip peteklerle takviye edilmiş kompozitlerin girinti testleri üzerindeki tepkisini deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Şekil ...' da -0,4'ten 1'e kadar Poisson oranına sahip bal peteği takviyeli kompozitin karşılık gelen tasarımını göstermektedir[122].

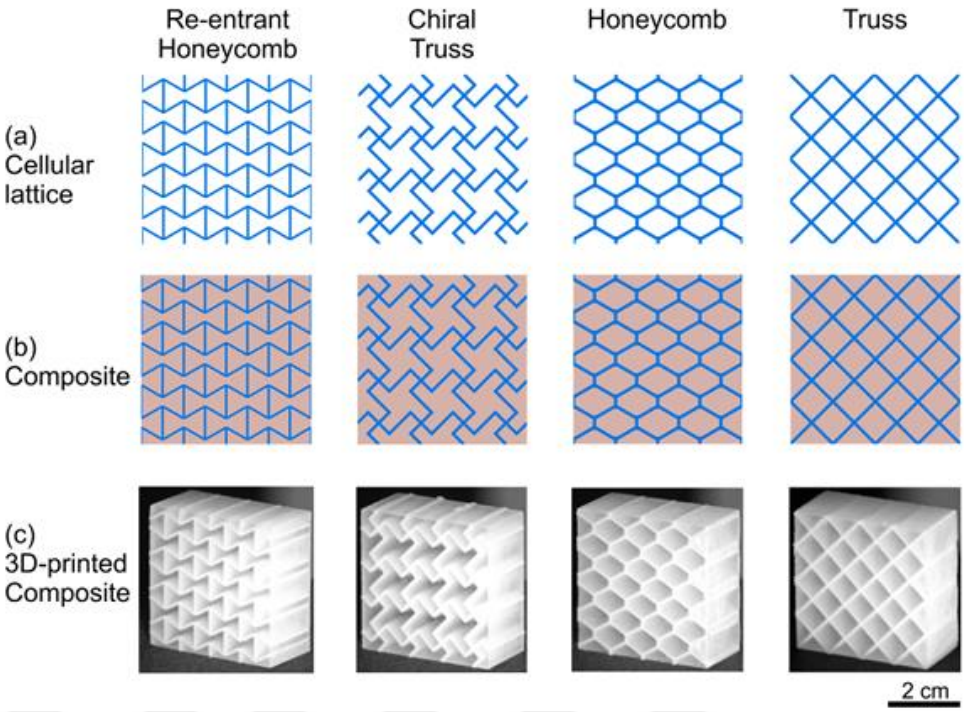
Şekil 1.28'deki ayrıntılarda, sırasıyla dört kafes takviyeli kompozit için deneysel sıkıştırma ve girinti testlerinden seçilen mekanik özellikleri karşılaştıran bir çubuk grafiği verilmiştir. Yeniden girişli petek takviyeli kompozitler, diğer üç kompozitle karşılaştırıldığında en yüksek sertliği, enerji emilimini, statik ve dinamik girinti sertliğini sergilemektedir [122].



Şekil 1.28: Farklı tasarımdaki hücre modellerinin mekanik değerleri [122].

Literatürde negatif Poisson oranı sergileyen oksetik malzemelerin daha iyi girinti direncine, darbe koruma kapasitesine ve artırılmış dayanıklılığa sahip olduğu gösterilmiştir. Li ve ekibi yardımcı kafes yapılarının takviye olarak kullanıldığı ve neredeyse sıkıştırılamaz yumuşak malzemenin matris olarak kullanıldığı bir yüksek performanslı kompozit çalışmasını raporlamıştır [123].

Şekil 1.29(a)'da gösterildiği gibi yeniden girişli bir petek ve kiral kafes dahil olmak üzere iki tip oksetik kafes yapısı dikkate alınmaktadır. Karşılaştırma amacıyla, negatif olmayan bir Poisson oranı sergileyen balpeteği ve kafes formunda iki tip düzenli kafes yapısı da gösterilmiştir. Her kafes yapısının ters alanlarını matris olarak başka bir malzeme ile doldurarak kafes yapılı takviyeli kompozitler tasarlanması planlanmıştır. Bu yapılardaki simetri ve hacim dağılımı, her bir kafes yapısındaki bağların kalınlığının uygun hale getirilmesiyle hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Şekil 1.29(b), takviye fazının hacim oranlarının %20'ye ayarlandığı, önerilen yeniden giriş yapan petek takviyeli kompozitleri, kiral kafes kiriş takviyeli kompozitleri, düzenli bal peteği takviyeli kompozitleri ve kafes takviyeli kompozitleri göstermektedir. Tasarlanan kafes yapılarının fazı, camsı bir polimer (VeroWhite) ile üretilen güçlendirilmiş alan olarak ayarlanır ve ters faz kauçuk benzeri bir malzeme (TangoPlus) ile üretilen matris alanı olarak planlanmıştır [123].



Şekil 1.29: Farklı hücre tasarımına sahip yapılar [123].

Numuneler, iki farklı malzemenin eş zamanlı basılmasına olanak tanıyan bir Objet Connex 260 çoklu malzeme 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Basma testleri için numuneler 4 x 4 birim hücreden oluşmakta ve Şekil 1.29(c)'de gösterilen 40 mm x 40 mm prototip boyutları elde edilmiştir. Bu yapıların 2 boyutlu düzlem içi mekanik davranışına odaklanarak, düzlem dışı deformasyonu önlemek için numunelerin kalınlığını 20 mm olarak tasarlanmıştır. 3B baskının anizotropik doğası göz önüne alındığında katman yöneliminin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini önlemek için tüm numuneler aynı yönde basılmıştır. Üretilen numuneler kürlenme doygunluğuna ulaşabilmesi için bir hafta boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur [123].

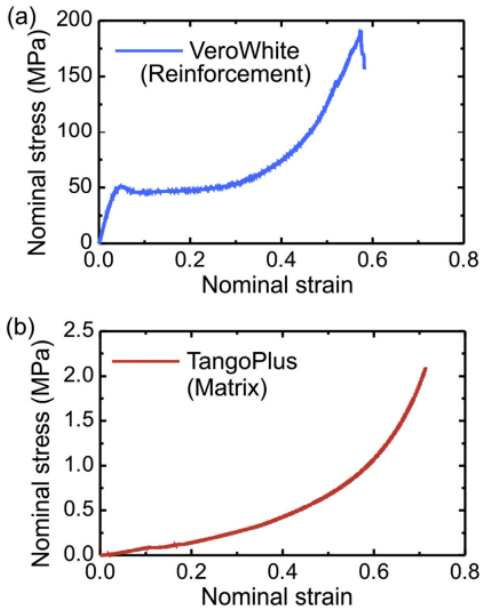
3B baskılı kurucu malzemelerin (VeroWhite ve TangoPlus) mekanik tepkisini tespit etmek için silindir numunelerinin tek eksenli sıkıştırma testleri ASTM D695 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Tek eksenli basınç testlerinden ölçülen yük-yer değiştirme eğrileri daha sonra numunelerin ölçülen boyutlarına dayalı olarak nominal gerilim-gerinim davranışlarına aktarılmıştır. Young modülü, nominal gerilim-gerinim eğrilerinin başlangıç doğrusal bölgesinden hesaplanmaktadır. Enerji emilimi, her kompozit numune için %25 tek eksenli basınç geriniminden önce nominal gerilim-gerinim eğrisi altındaki iş olarak hesaplanmaktadır [123].

Kafes takviyeli kompozitlerin tek eksenli sıkıştırma altında mekanik tepkisine ilişkin sayısal simülasyonlar, ABAQUS/Standard (Simulia, Providence, RI) kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların tamamında 4x4 birim hücreli modeller kullanılmıştır [123].

Sayısal simülasyonda izotropik malzeme modeli seçilmiştir. Bileşen fazlar camsı bir polimer ve bir elastomer malzeme olarak alınmıştır. Camsı polimerin gerilim-gerinim davranışı, VeroWhite'ın gerçek gerilim-gerinim ilişkisinden aktarılan elastik-viskoplastik bir model kullanılarak hesaplanmıştır. TangoPlus'ın elastomerik gerilim-gerinim davranışı, hiperelastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Başlangıç kayma modülü 0,213 MPa ve kilitleme gerilimi 1,90 olan Arruda-Boyce hiperelastik modeline dayanmaktadır. Sayısal analizde deneysel koşulları simüle etmek için üst yüzeye tek eksenli deplasman yüklemesi uygulanırken alt kısım dikey yönde sabitlenmiştir [123].

3B baskılı kurucu malzemeler ilk olarak ASTM D695 standardına uygun olarak tek eksenli sıkıştırma altında mekanik olarak test edilir. Şekil 1.30'da, iki ana malzemenin basınç gerilimi-gerinim tepkilerini gösterir ve bu gerilim-gerinim eğrilerinden elde edilen mekanik özellikler Çizelge 1.6'da sunulmuştur. 3B baskı malzemesi VeroWhite için gerilim-gerinim davranışı, başlangıçtaki doğrusal elastikiyeti, akma, akma sonrası, gerinim yumuşamasını ve daha büyük gerinimlerde müteakip gerinim sertleşmesini sergilemiştir. 3B baskı malzemesi TangoPlus için gerilim-gerinim eğrisi hiperelastik bir davranışı gösteren J şeklinde olduğu yorumlanmıştır [123].

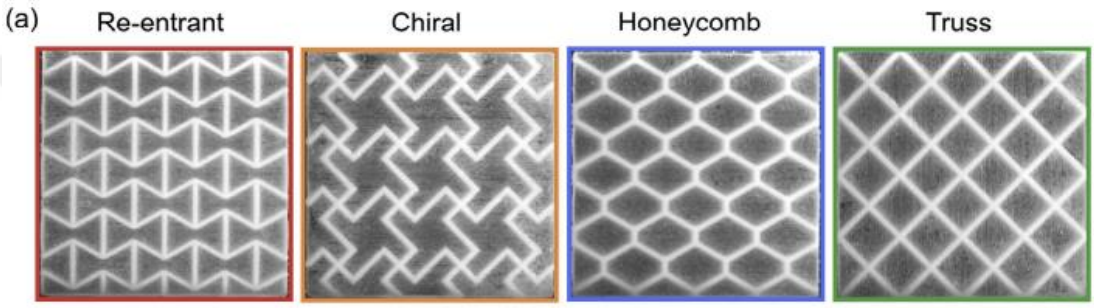


Şekil 1.30: Takviye ve matris malzemesinin gerinim-gerilim grafikleri [123].

Çizelge 1.6: Takviye ve matris malzemesinin gerilim-gerinim değer çizelgesi [123].

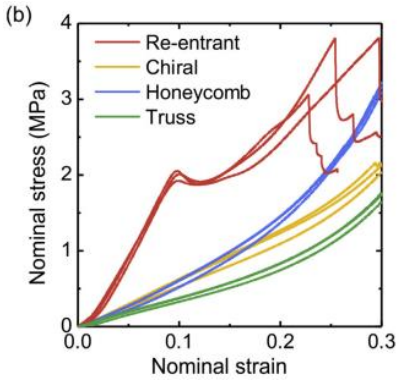
Malzeme	Young modülü (MPa)	Basma akma dayanımı (MPa)	Nihai basma dayanımı (MPa)	Tokluk (J/m^3)	Enerji absorpsiyonu (J/m^3)
VeroWhite	1513	50,5	187,5	42,3	11,0
TangoPlus	0,77	-	-2,1	0,38	0,02

İlk olarak yardımcı kafes takviyeli kompozitlerin basınç davranışını deneysel açıdan incelenmiştir. Şekil 1.31'de gösterilen yeniden girişli petek, kiral kafes, düzenli petek, kafes yapı topolojisine sahip dört tip mimari kafes takviyeli kompozit, 3B baskı kullanılarak üretilmiştir.



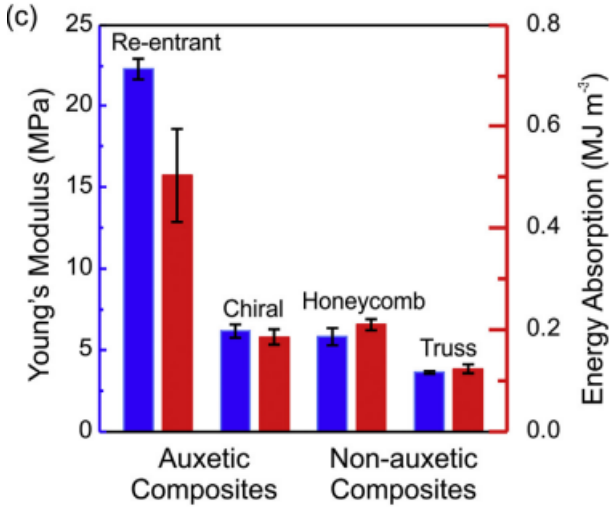
Şekil 1.31: Farklı kafes yapı topolijisine sahip tasarımlar [123].

Burada takviye fazının aynı hacim oranı olan %20'yi kullanılmıştır. Gerilim-gerinim eğrileri, Şekil 1.32'de görülebileceği gibi her bir kompozit için iyi bir tekrarlanabilirlik göstermiştir. Yeniden giren petek takviyeli kompozitler diğer üç kompozite göre açık bir üstünlük göstermiştir. Gerilim maksimuma ulaştıktan sonra yeniden girişli petek takviyeli kompozitlerin gerilim-gerinim tepkisinde ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yerel olarak stresi en üst düzeye çıkaracak ve olumsuz sonuçlanacak bir hasara yol açacak olan sıkıştırma deformasyonu sırasında yeniden girişli petek yapılarının dengesizliği olarak yorumlanmıştır. Kiral kafes, düzenli petek ve kafes petek takviyeli kompozitlerin eğrileri, yapıların stabilitesinden dolayı 0,3'lük bir şekil değiştirmeye kadar düzgün kavisli geçiş sergilemiştir [123].



Şekil 1.32: Farklı tasarıma sahip yapıların gerilim-gerinim grafiği [123].

Şekil 1.33'te yeniden girişli bal peteği takviyeli kompozitlerin Young modülünün, kiral kafes kiriş ve normal bal peteği takviyeli kompozitlerinkinden dört kat daha büyük ve kafes kiriş takviyeli kompozitlerinkinden beş kat daha büyük olduğunu niceliksel olarak göstermektedir. Ayrıca, yeniden girişli petek takviyeli kompozitlerin %25'lik bir gerinimdeki enerji emilimi, diğer üç kompozit tipinden üç kat daha fazladır [123]. Yeniden girişli bal peteği kafesi ve kiral kafes, negatif Poisson oranı etkisine sahip iki tipik yardımcı yapı olduğundan, bu sonuçlar, kafes takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin arttırılmasında yardımcı kafes geometrilerinin, özellikle de yeniden girişli bal peteği yapılarının kullanılmasının avantajını açıkça göstermektedir [123].



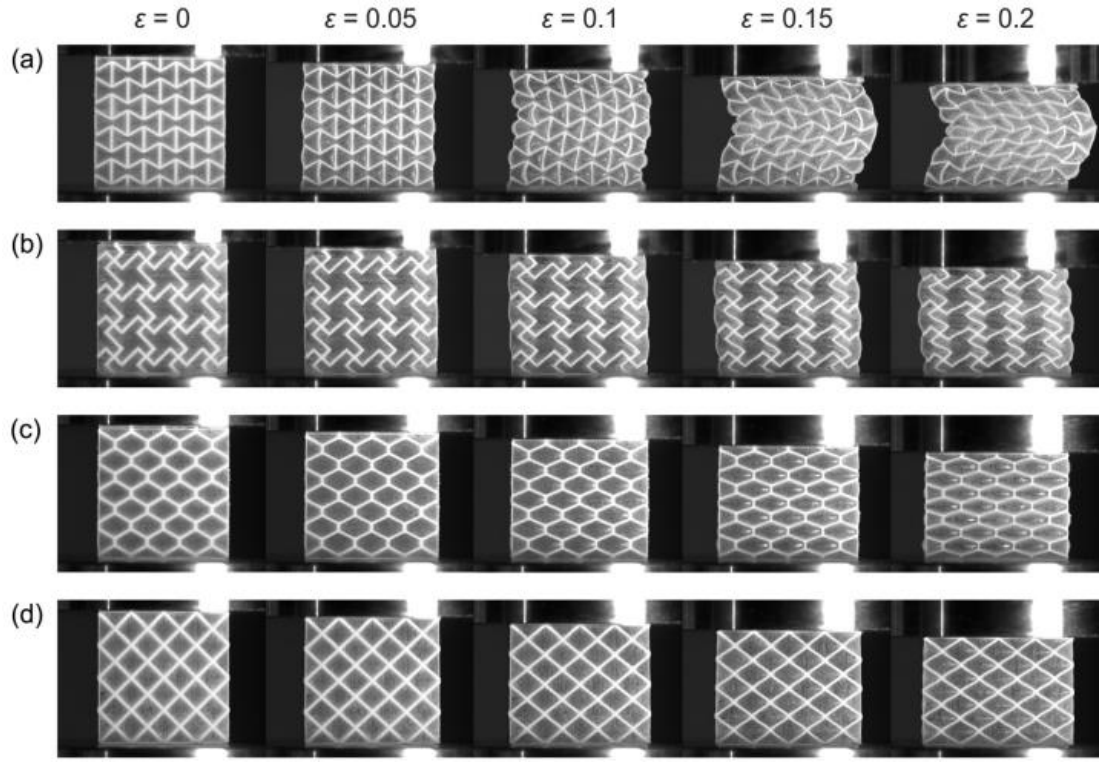
Şekil 1.33: Farklı hücre yapılarına ait Young modül ve enerji absorbsiyon grafiği.

Şekil 1.34(a)'da ilgili dört kafes takviyeli kompozitin farklı gerinim seviyelerinde deformasyon davranışını sergileyen bir dizi görüntüyü gösterilmiştir. Küçük bir basınç geriniminde (<0,05), yeniden girişli petek takviyeli kompozitlerin ortalama olarak yanal bir büzülme sergilediği açıktır. Oksteik kafes takviyeli kompozitin, Şekil 4a'te

gösterildiği gibi, küçük deformasyonda hala yardımcı davranışa sahip olduğunu gösterilmiştir. Bununla birlikte, yeniden girişli petek takviyeli kompozitin kararsızlığı, 0,1'lik gerinimden başlayarak gözlemlenebilmektedir [123].

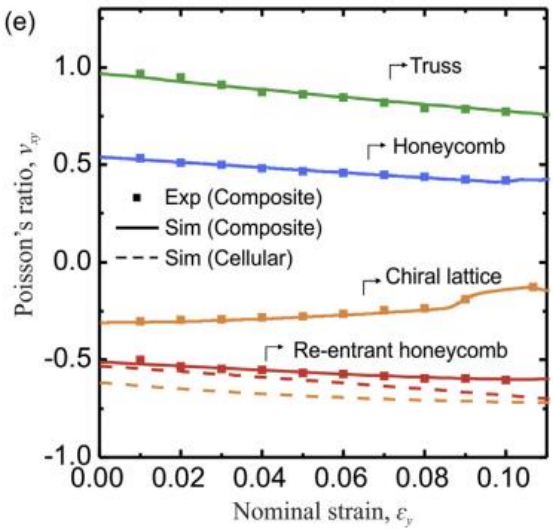
Kiral kafes aynı zamanda oksetik bir yapı olmasına rağmen, kiral kafesle güçlendirilmiş kompozitler, Şekil 1.34(b)'de gösterildiği gibi küçük deformasyonlarda belirgin yardımcı davranış sergilemediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, ters faz olarak matris elastomerinin kiral takviye fazının dönüşünü engellemesi ve bunun sonucunda yanal büzülmenin azalmasıdır [123].

Oksetik kafes takviyeli kompozitlerin aksine, oksetik olmayan kafes takviyeli kompozitler hem geleneksel petek hem de kafes takviyeli kompozitler, Şekil 1.34(c)-(d)'deki deformasyon sırasında net bir yanal genleşme sergilemektedir [123].



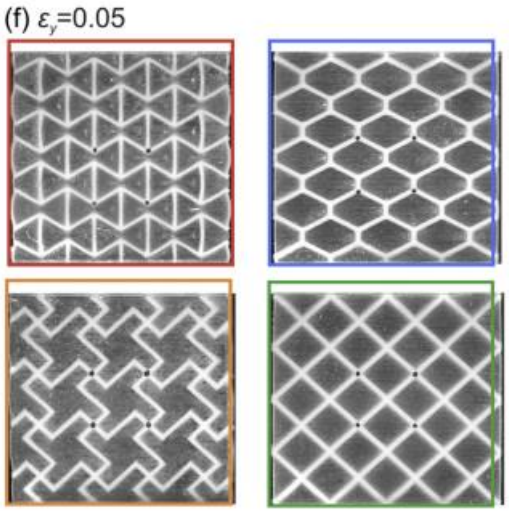
Şekil 1.34: Tek eksenli sıkıştırma testleri altında numunelerin davranışı [123].

Şekil 1.35'te tek eksenli sıkıştırma testleri altında dört kafes takviyeli kompozitin tümü ve bunların karşılık gelen hücresel karşılıkları için Poisson oranlarının deneysel ve sayısal çalışmasını gösterir [123].



Şekil 1.35: Farklı hücre tasarımlarına göre Poisson oranı-gerilim grafiği [123].

Şekil 1.36'da deneyler sırasında kompozitlerde meydana gelen deformasyonu ölçmek için, sınır koşullarının etkisi altında numunenin dört kenarına yakın deformasyondan kaçınarak merkezdeki dört noktayı tanımlayarak deformasyon değişimi hesaplanmıştır. Burada dikdörtgen çerçeveler numunelerin basınç deformasyonundan önceki orjinal kenarlarını temsil etmektedir. Yeniden girişli petek takviyeli kompozitin yanal büzülmesi, kiral kafes takviyeli kompozitin dönmesiyle birlikte hafif yanal büzülme ve 0,05'lik makroskobik basınç geriniminde bal peteği ve kafes kiriş takviyeli kompozitlerin yanal genleşmesi fark edilebilmektedir. Poisson oranlarına ilişkin deneysel ve sayısal sonuçlar, dört kompozit türü için mükemmel bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [123].



Şekil 1.36: Farklı tasarımdaki modellerin 0,05 gerinimdeki görüntüsü [123].

Sonuç olarak oksetik kafes takviyeli kompozitlerin makroskopik mekanik tepkilerini 3B baskı, deneyler ve sayısal analizlerin bir kombinasyonu yoluyla araştırılmıştır. Oksetik kafes takviyeli kompozitlerin, oksetik olmayan kafes takviyeli kompozitlerle karşılaştırıldığında benzersiz bir sertlik ve enerji emilimi kombinasyonu elde edilerek gelişmiş mekanik performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Özellikle, kafes takviyelerinde negatif Poisson oranı etkisinden faydalanarak oksetik takviye ile matris arasındaki karşılıklı kısıtlamaların, matris fazından ek destek alarak gelişmiş mekanik özelliklere olanak sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca Poisson oranının çeşitli petek takviyeli kompozitlerin diğer mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ölçülmüştür. Bu durum da oksetik davranış derecesinin kafes takviyeli kompozitlerin sertliğini ve enerji emilimini ayarlamak için kullanılabileceği gösterilmiştir [123].

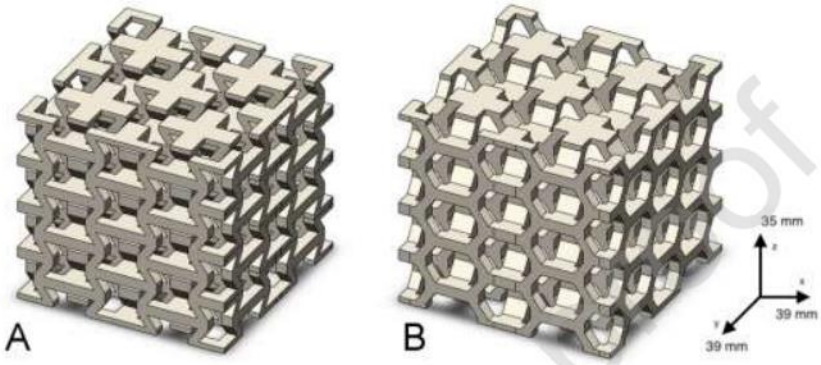
Lvov ve arkadaşları, yeniden girişli bal peteği oksetik yapısı için teorik hesaplamalar, bilgisayar simülasyonları ve Poisson oranının deneysel değerlendirmesinin birleşimini gerçekleştirmiştir. Termoplastik poliüretan (TPU) malzemesi kullanılarak 3B baskılı numuneler için optimum bal peteği hücre parametreleri belirlenmiştir. Poisson oranını hesaplamak için 150×20×4 mm boyutlarındaki tek katmanlı düzlem modeli olan Şekil 1.37'de gösterilen ISO 527-1/ASTM D638'e uygun olarak çekme ve basma testleri simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar ağı 5203 düğüm ve 2195 eleman içermektedir. %5 yakınsama toleransı kullanılmıştır. Aynı model aynı zamanda gerilimdeki Poisson oranının deneysel ölçümleri için numunelerin 3 boyutlu baskısında girdi olarak da kullanılmıştır [124].



Şekil 1.37: Çekme testi için üretilmiş numune [124].

Üretim sırasında 1,75 mm çapında termoplastik poliüretan (molekül ağırlığı 100,000 g/mol, REC 3D, Rusya) filamenti, 3B yazıcı BiZon Prusa i3 Steel PRO (3DiY, Rusya) aracılığıyla FDM 3B baskı için kullanılmıştır. 3B yazdırma sırasında 15 mm/sn besleme hızı, 225 °C püskürtme ucu sıcaklığı ve 60°C baskı yatağı sıcaklığı tercih edilmiştir [124].

Poisson oranı ölçümleri, evrensel bir test makinesi Zwick/Roell Z020 (Zwick GmbH & Co. KG, Almanya) kullanılarak gerçekleştirildi. 3B baskılı 150x20x4 mm numuneler için değerlendirmek üzere boyuna ve enine yer değiştirmeleri izlemeye yönelik ek göstergeler kullanılmıştır. Şekil 1.38'de gösterilen 39x39x35 mm boyutlarındaki dikdörtgen kesitli numuneler için döngüsel sıkıştırma testleri yapılmıştır [124].



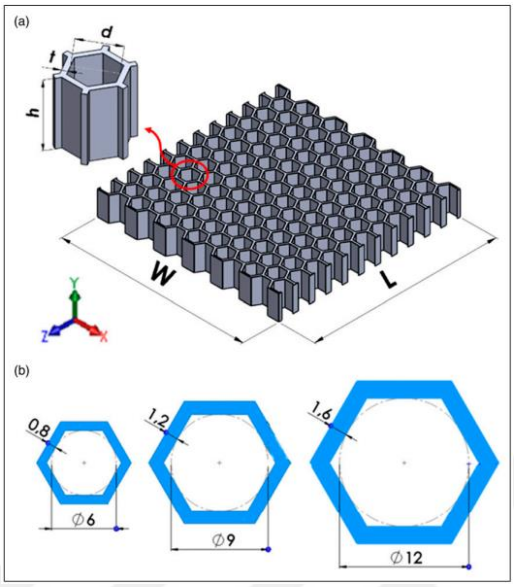
Şekil 1.38: Dikdörtgen kesit numuneler için sıkıştırma testi numunesi [124].

3B baskılı yeniden girişli petek oksetik numunelerinin düşük döngülü sıkıştırma testleri, oksetik altıgen hücreye dayalı yapının, benzer oksetik olmayan yapıya kıyasla neredeyse 1,75 kat daha fazla çok düşük yorulma döngülerine dayanabildiğini göstermiştir. 500 sıkıştırma döngüsünden sonra oksetik örnekte 3 boyutlu yapılarda ne hata ne de katman delaminasyonu tespit edilmiştir. 3B baskılı oksetik yapılar tıp ve spordaki uygulamalar için umut verici bir aday olduğu belirtilmiştir. Çalışılan oksetik yapılar, oksetik olmayan yapılara kıyasla daha az miktarda enerji absorbe edebilmeleri nedeniyle daha iyi mekanik enerji dağıtımı için potansiyel olarak enerji sönümleyici mantığında kullanılabileceği bildirilmiştir [124].

Kaveloğlu ve ekip arkadaşı, Ultimaker 3B yazıcı kullanarak polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren filamentten üretilen petek yapılarının maksimum basınç kuvvetini araştırmıştır. Eşit yüzey alanına sahip, üç farklı hücre boyutuna ve duvar kalınlığına sahip bal peteği yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan numuneler 6 mm, 9 mm, 12 mm hücre genişliğine; 0,8 mm, 1,2 mm, 1,6 mm hücre duvarı kalınlığına ve 10 mm, 20 mm, 30 mm hücre yüksekliğine sahip olarak üretilmiştir [125].

Numuneler ASTM C365-16 standartlarına uygun olarak minimum sıkıştırma yüzey alanı 5625 mm^2 (75 mm × 75 mm) olacak şekilde SolidWorks CAD yazılımı üzerinde tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Şekil 1.39'da gösterilen

numunelerin sıkıştırma yüzey alanları sırasıyla 6 mm, 9 mm, 12 mm hücre genişliği ve 0,8 mm, 1,2 mm, 1,6 mm duvar kalınlığına sahip petek panelden kare şeklinde bir yapılar üretilmiştir [125].



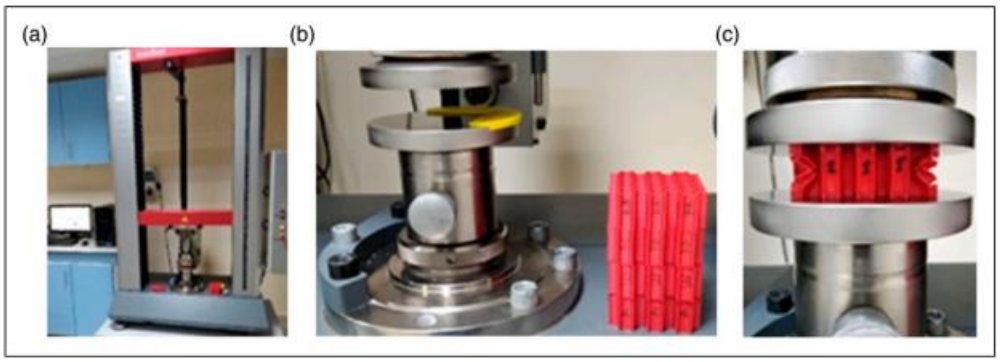
Şekil 1.39: Petek panallerin hücre genişlik ölçüleri [125].

Tasarlanan yapıların hücre yüzey alanları Çizelge 1.7'de verildiği gibi SolidWorks kullanılarak ölçülmüştür [125].

Çizelge 1.7: Tasarlanan yapıların yüzey alanları [125].

Hücre genişliği (d) (mm)	Hücre duvar inceliği (t) (mm)	Toplam yüzey alanı (mm^2)
6	0,8	1222,65
9	1,2	1222,16
12	1,6	1207,46

Şekil 1.40'da görüldüğü gibi ASTM C365-16 standartlarına uygun olarak 0,5 mm/dk hızla gerçekleştirilen basma testleri için 100 kN kapasiteli Zwick/Roell Z100 kullanılmıştır. Böylece PLA ve ABS filamentlerden farklı hücre boyutları ile 3B yazıcı kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür.



Şekil 1.40: Basma testi düzeneği ve numuneri [125].

Yoğunluğu 1267 kg/m^3 olan PLA numunelerinin, yoğunluğu 1138 kg/m^3 olan ABS numunelerine göre daha yüksek kütleye sahip olduğu görülmektedir. Eşit yüzey alanına sahip, farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığı değerlerine sahip numunelerin benzer kütlelere sahip olması da dikkat çekici olduğu bildirilmiştir. Ayrıca PLA numunelerinin gözeneklilik yüzdeleri ABS numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır.

Bu yapılar deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle basınç dayanımları açısından analiz edilmiştir. PLA ve ABS numuneleri üzerinde yapılan deneysel sıkıştırma testlerinden elde edilen veriler, daha yüksek hücre yüksekliğinin daha düşük burulma yüküne ve daha yüksek gözenekliliğe yol açtığını ve bunun da maksimum sıkıştırma kuvvetini yaklaşık %19 oranında azalttığını göstermiştir. PLA numunelerinin ABS numunelerine göre daha yüksek maksimum sıkıştırma kuvvetine sahip olduğu gözlenmiştir. En yüksek maksimum sıkıştırma kuvveti 99,56 kN ile PLA_12_1.6_10 (hücre çapı_hücre duvarı kalınlığı_hücre yüksekliği) örneklerine ait olduğu bildirilmiştir [125].

Üç farklı hücre genişliği ve duvar kalınlığı değerlerine sahip yapılar üzerinde ANSYS yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analiz bulguları, yaklaşık %81–98 aralığında, deneysel analizden elde edilenlere benzer sonuçlar vermiştir. Hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizinde aynı yüzey alanı ve kütleye sahip petek yapıların hücre genişliği değerleri artmasına rağmen hücre duvarı kalınlığının artması nedeniyle maksimum sıkıştırma kuvvetinin de arttığı tespit edilmiştir. Deneysel ve sayısal basma testlerinde sırasıyla %6 ve %10 PLA numunelerinde, ABS numunelerinde ise her iki parametrede de %15 belirlenmiştir [125].

Literatür araştırması gerçekleştirildiğinde genellikle literatürde bulunan hali hazırdaki tasarımların farklı malzemeler ve yöntemler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarına değinilmiştir. Bu çalışma kapsamında pozitif ve negatif Poisson oranına sahip oksetik

ve oksetik olmayan iki farklı tasarım seçilmiştir. Buna ek olarak oksetik özelliğe sahip tasarımda modifikasyon yapılarak iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Buradaki amaç tasarımın ana yapısını bozmadan negatif Poisson değerine sahip daha iyi basma ve eğme dayanımı elde edilebileceğini göstermektir. Modifiye edilerek geliştirilen tasarım literatüre katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme

Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat üretiminde çekirdek yapı baskısı için Şekil 2.1' de gösterilen FDM sınıfı Bluer 3B Yazıcı (Two Trees) kullanılmıştır.



Şekil 2.1: Two Trees Bluer 3B yazıcı.

Two Trees Bluer 3B yazıcı özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Two Trees Bluer 3B yazıcı özellikleri.

Açıklama	Özellikler
Baskı tipi	Eriyik Biriktirme Modeli – (FDM)
Nozul sayısı (adet)	1
Nozul çapı (mm)	0.4
Baskı hacmi (mm)	230 x 230 x 280
Baskı doğruluğu (mm)	± 0,1-0,2 mm
Katman kalınlığı	0,1-0,4 mm
Filament çapı (mm)	1,75
Ekstrüzyon kafa sıcaklığı (en yüksek) (°C)	260

Şekil 2.2'de çekirdek yapıların baskıları için tüm 3B yazıcılarla uygun termoplastik malzeme olan 1,75 mm çapında Poli(laktik asit)(PLA) filament PORİMA firması tarafından üretilmiş ve temin edilerek kullanılmıştır.



Şekil 2.2: PLA filament.

Çizelge 2.2' de kullanılan PLA filamentinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2: Kullanılan PLA malzemesinin özellikleri.

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (23 °C)	1,23 g/cm^3
Eriyik akış indeksi	17,3 g/10 dk
Çekme mukavemeti	56 MPa
Kopma uzaması	% 7
Elastisite modülü	2850 MPa
Isıda eğilme sıcaklığı	55 °C
Camsı geçiş noktası	55-60 °C
Erime noktası	120-170 °C
Çalışma sıcaklığı	200–220 °C

Şekil 2.3'te gösterilen malzemeler üretim sırasında kullanılan çekirdek yapıları, sandviç kompozit panel formuna dönüştürmek için karbon kumaş (245 g/m^2) Kompozit Pazarı firmasından ve MGS epoksi reçine L160/H260S Dost Kimya firmasından tedarik edilerek kullanılmıştır. Çizelge 2.3 ve 2.4'te kullanılan karbon kumaş ve epoksi reçinenin özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.3: Karbon kumaş 245 g/m^2 (solda), epoksi reçine (sağda).

Çizelge 2.3: Kullanılan karbon kumaş özellikleri.

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (23 °C)	1,79 g/cm^3
Kütle	245 tex
Çekme mukavemeti	3800 MPa
Çekme modülü	240 GPa
Kopma uzaması	% 1,6
Elastisite modülü	2850 MPa
Elyaf tipi	Plain

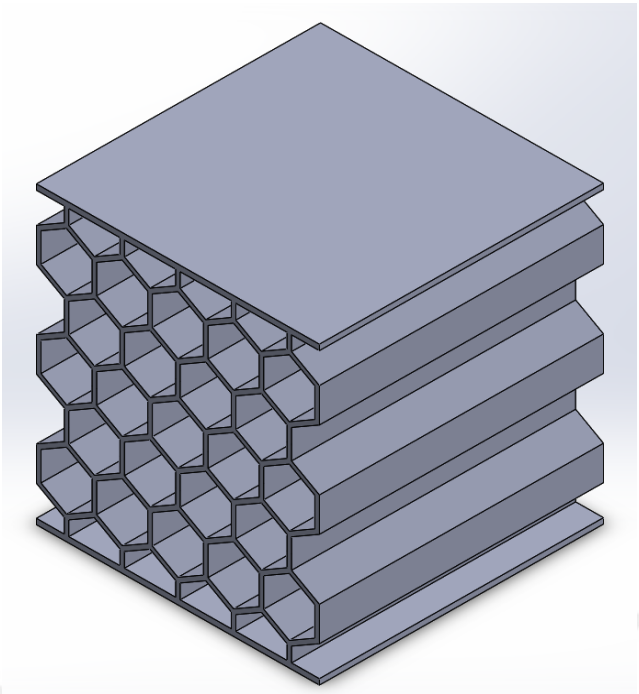
Çizelge 2.4: Kullanılan epoksi reçine özellikleri.

Özellikler	Değerler
Yoğunluk (23 °C)	1,13 – 1,17 g/cm^3
Viskosite	700 – 900 mPas
Çekme mukavemeti	70 – 80 N/mm^2
Basma mukavemeti	80 – 100 N/mm^2
Eğme mukavemeti	110 – 140 N/mm^2
Kopma uzaması	% 5,0 – 6,5
Elastisite modülü	3,2 – 3,5 kN/mm^2
Kür işlemi	24 saat 23 °C

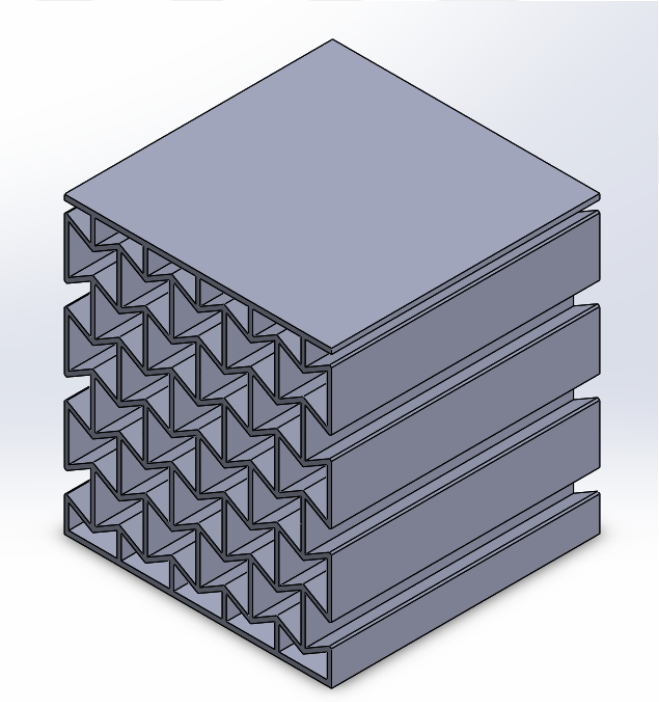
2.2 Yöntem

2.2.1 Çekirdek yapı modellemesi

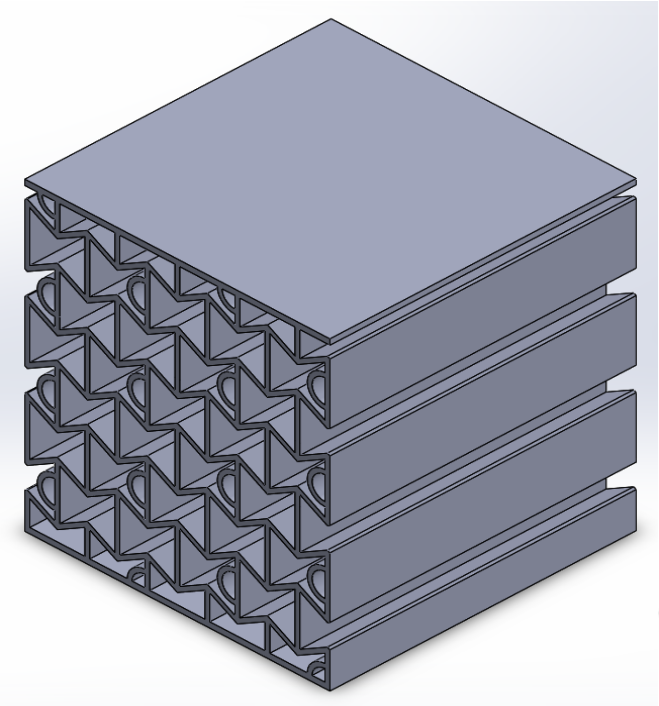
Üretimi gerçekleştirilen çalışma kapsamında 3 farklı hücre modeli tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde çekirdek yapılar Bal Peteği hücre yapı, Yeniden Girintili hücre yapı ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili hücre yapı olarak belirlenmiştir. Bal Peteği hücre yapısı oksetik olmayan pozitif Poisson değerine sahip, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili hücre yapıları ise oksetik olan negatif Poisson değerine sahip olarak tasarlanmıştır. Çekirdek yapıların tasarımları SolidWorks bilgisayar destekli 3 boyutlu katı modelleme ve tasarım programı desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kübik modellemeler Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Bal Peteği kübik modelleme.



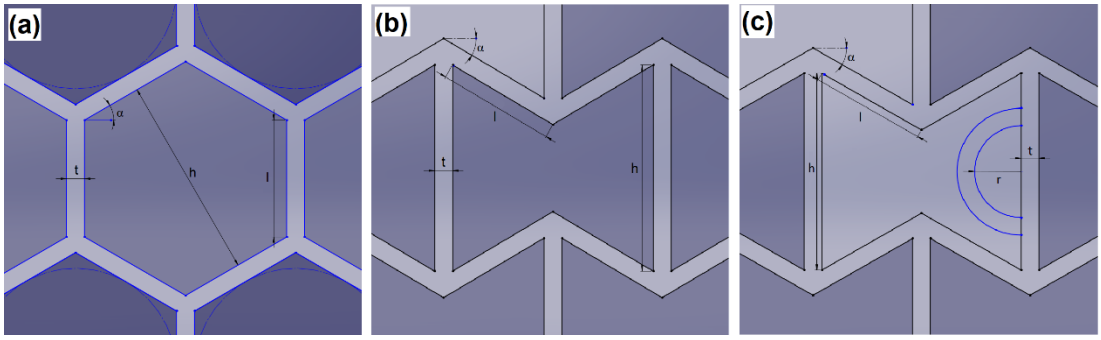
Şekil 2.5: Yeniden Girintili kübik modelleme.



Şekil 2.6: Geliştirilmiş Yeniden Girintili kübik modelleme.

Tasarımların arasındaki kıyaslamayı yapabilmek için hücre boyutları ve yüzey alanları eşit tutulmuştur. 3B yazıcının nozul çapı 0,4 mm olduğundan dolayı hücre duvarı kalınlığı 0,4'ün katı olarak ayarlanmıştır.

Üç farklı tasarıma sahip yapıların çekirdek topolojileri incelenmiştir. Şekil 2.7'de sırasıyla Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Girintili yapıların birim hücreleri gösterilmiştir.



Şekil 2.7: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

Her birim hücreye yönelik tasarım parametreleri Çizelge 2.5'te gösterilmektedir. Birim hücrelerin tasarım parametreleri şu şekildedir: Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili. Birim hücrelerde h ve l sırasıyla dikey ve eğimli hücre duvarlarının uzunluğunu belirtirken, α eğimli duvarların açısını belirmektedir. Ayrıca t, tüm birim hücrelerdeki hücre duvarlarının kalınlığıdır. Ek olarak Geliştirilmiş

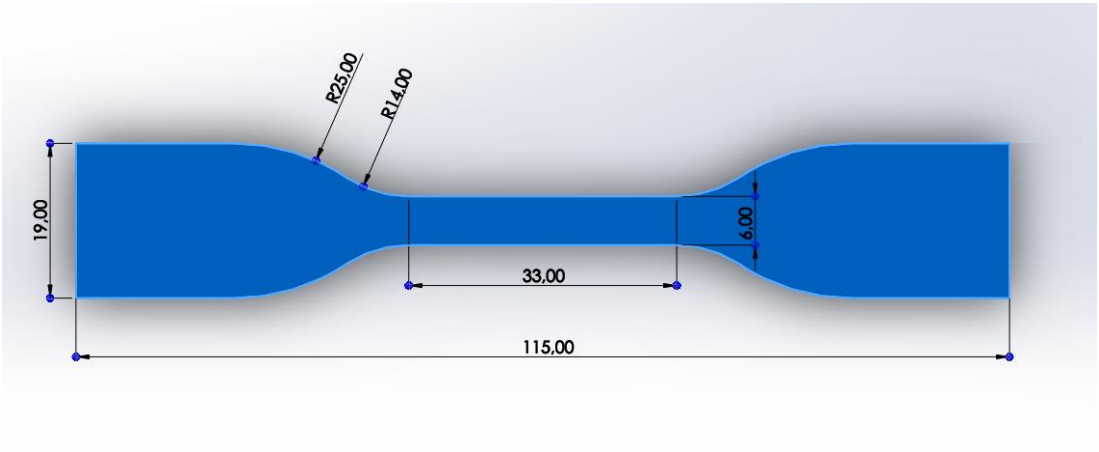
Yeniden Girintili modelde modifiye edilerek eklenen yarım daire tasarımında r, yarıçap ölçüsü gösterilmektedir. Karşılaştırılabilir tasarımlar yapabilmek için birim hücre sayısı ve yapıların yükseklik, genişlik ve derinlik bakımından toplam boyutları yaklaşık olarak aynıdır.

Çizelge 2.5: Her modelin birim hücre boyutu.

Yapı	l (mm)	h (mm)	t (mm)	α (°)	r (mm)
Bal Peteği	5,20	9	0,8	30	-
Yeniden Girintili	5,20	9	0,8	-30	-
Geliştirilmiş Yeniden Girintili	5,20	9	0,8	-30	2,10

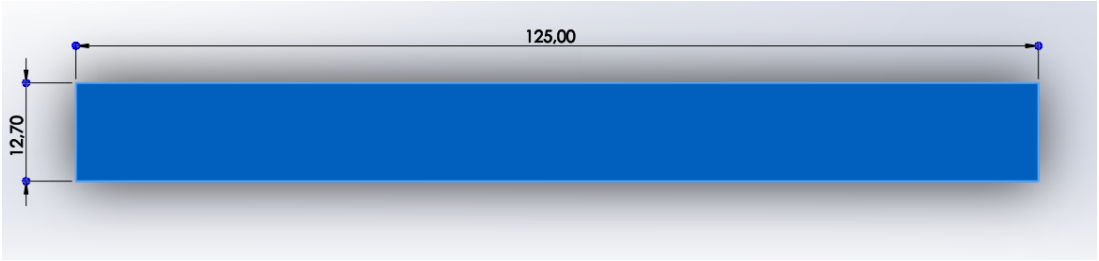
İlgili PLA yapıların malzeme karakterizasyonu için üç nokta eğme, çekme testi numune tasarımı ve Poisson değerleri tespiti için kübik numune tasarımı dizayn edilmiştir. Sandviç kompozitlerin mekanik testleri için çekirdek yapının üç nokta eğme ve basma testi numuneleri farklı ölçülere sahip olarak tasarlanmıştır.

PLA yapıları için çekme testi numunesi ASTM D638-4 standardına uygun Şekil 2.8'de gösterildiği gibi geleneksel "dogbone" geometrisinde tasarlanmıştır [126, 127]. ASTM D638-4 standardına uygun numunenin dış ölçüleri 115×19×3,2 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.8: ASTM D638-4 standardında tasarlanan numune.

PLA malzemesi için üç nokta eğme testi numunesi, ASTM D790 standardına uygun Şekil 2.9'da gösterildiği gibi dikdörtgen geometrisinde tasarlanmıştır [128]. ASTM D790 standardına uygun numunenin dış ölçüleri 135 mm × 130 mm × 3,2 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.9: ASTM D790 standardında tasarlanan numune.

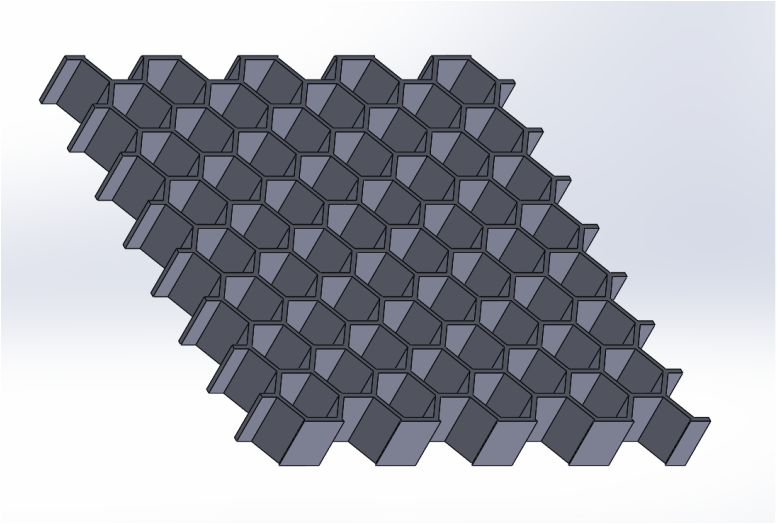
Hücrelerin davranışını belirlemede yardımcı olmak için tasarlanan kübik modeller ise literatür araştırmalarına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4, Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da gösterilen kübik modeller 50 mm × 50 mm × 50 mm olarak belirlenmiştir. Fakat modellerin farklı hücre tasarımlarından dolayı aynı hücre sayısına sahip olabilmesi ve optimum kesite sahip olabilmesi için ± 5 mm tolerans verilmiştir.

Basma testi için sandviç kompozitlerde kullanılmak üzere tasarlanan çekirdek yapıların ASTM C365 - Sandviç Çekirdeklerin Düzlemsel Basınç Özellikleri için Standart Test Yöntemi' nde belirtilen ölçülere göre tasarımı gerçekleştirilmiştir [129]. ASTM C365 standardına göre minimum sayıda hücrenin test edildiğinden emin olmak için numunenin gerekli kaplama alanı hücre boyutuna bağlı olduğu bildirilmiştir. Yaygın hücre boyutları için Çizelge 2.6'de minimum tavsiye edilmektedir.

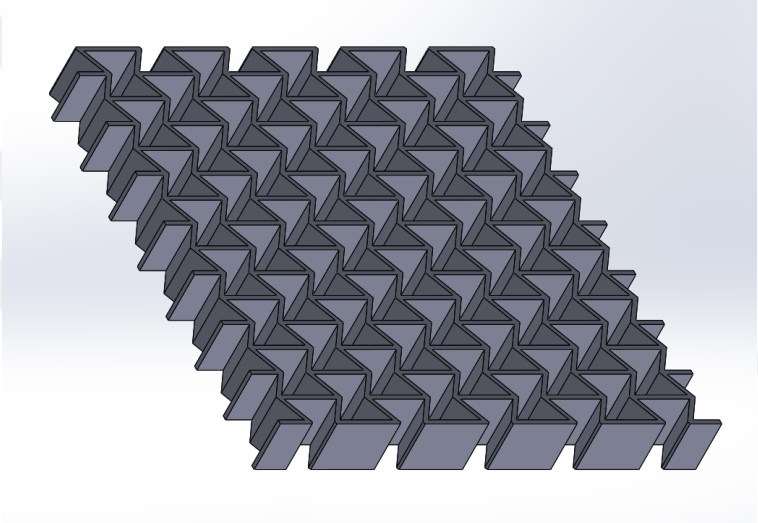
Çizelge 2.6: ASTM C365 önerilen minimum numune kesit alanı.

Minimum Hücre Ölçüsü (mm)	Maksimum Hücre Ölçüsü (mm)	Minimum Kesit Alanı (mm^2)
-	3	625
3	6	2500
6	9	5625

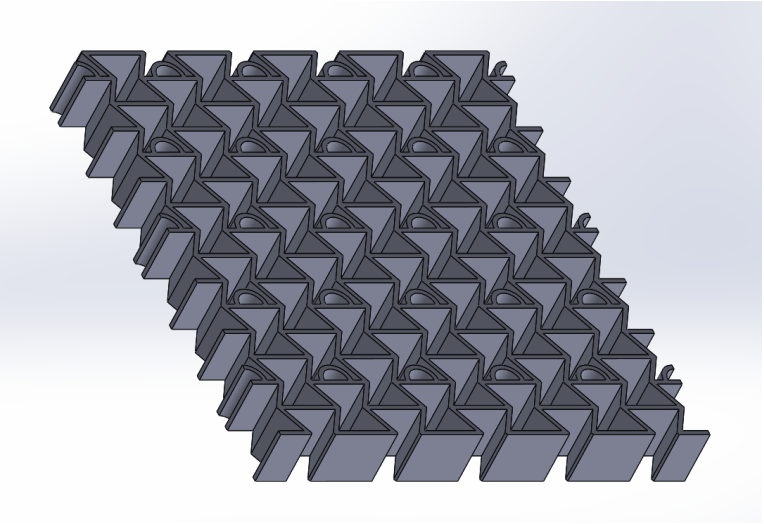
Önerilen minimum numune kesit alanına göre tasarlanan yapıların hücre genişliği 9 mm olduğu için 5625 mm^2 kesit alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple basma numuneleri için tasarım ölçüleri 75 mm × 75 mm olarak belirlenmiştir. Bal Peteği basma numunesi tasarımı Şekil 2.10, Yeniden Girintili basma testi numune tasarımı Şekil 2.11 ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili basma numune tasarımı Şekil 2.12' de gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Bal Peteği basma numunesi.

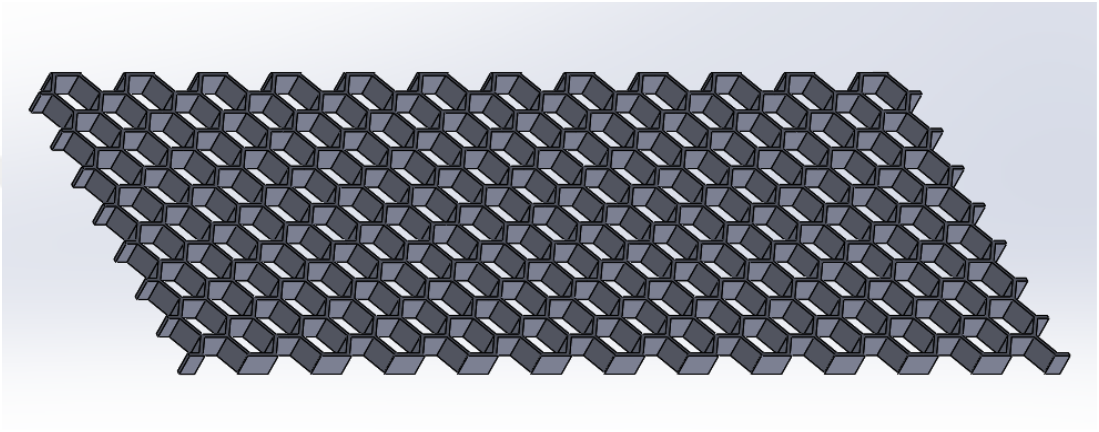


Şekil 2.11: Yeniden Girintili basma numunesi.

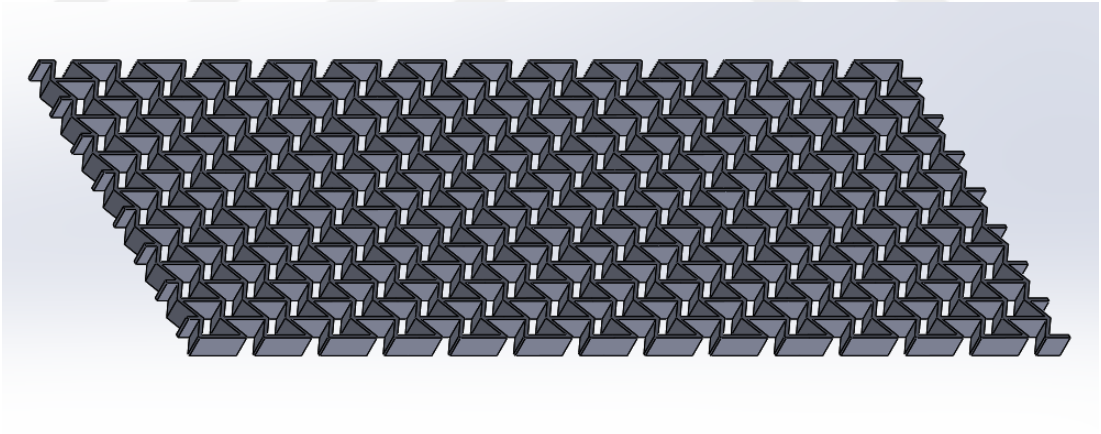


Şekil 2.12: Geliştirilmiş Yeniden Girintili basma numunesi.

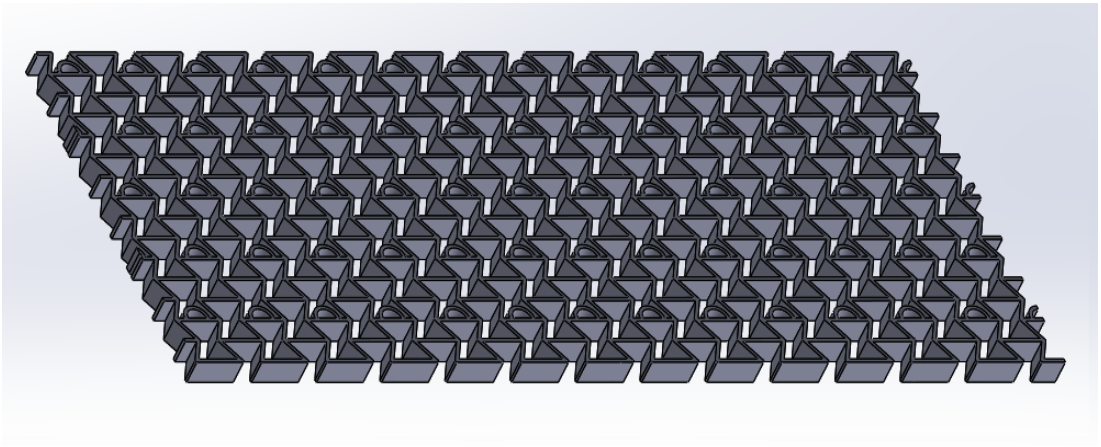
Üç nokta eğme testi için sandviç kompozitlerde kullanılmak üzere tasarlanan çekirdek yapıların ASTM C393 - Kiriş Eğilmesiyle Sandviç Yapıların Çekirdek Kayma Özellikleri için Standart Test Yöntemi'nde belirtilen ölçülere göre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Test numunesi 75 mm genişliğinde ve 200 mm uzunluğunda enine kesitte dikdörtgen olacak şekilde tasarlanmıştır. Bal Peteği üç nokta eğme numunesi tasarımı Şekil 2.13, Yeniden Girintili üç nokta eğme testi numune tasarımı Şekil 2.14 ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili üç nokta eğme numune tasarımı Şekil 2.15' de gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Bal Peteği üç nokta eğme testi numunesi.



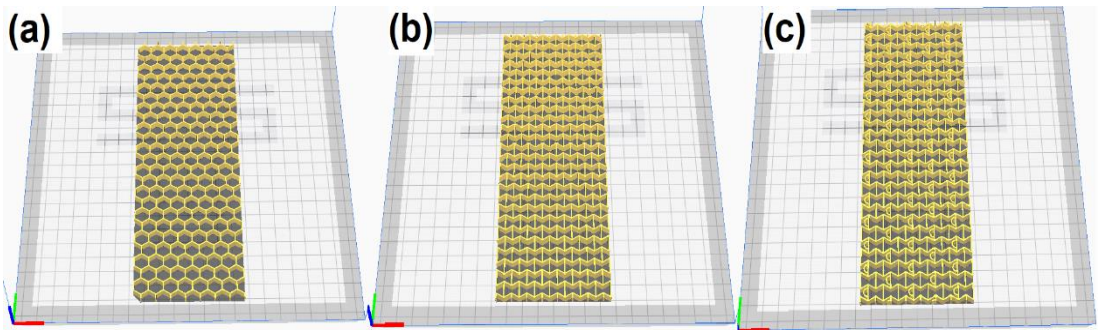
Şekil 2.14: Yeniden Girintili üç nokta eğme testi numunesi.



Şekil 2.15: Geliştirilmiş Yeniden Girintili üç nokta eğme testi numunesi.

2.2.2 Çekirdek yapı numune üretimi

Çalışma kapsamında tüm numuneler FDM tipi Bluer 3B Yazıcı (Two Trees) tarafından üretilmiştir. Üretim kapsamında Bluer 3B yazıcı, kullanılacak olan PLA malzemesini basmak için uygun şartları sağlamaktadır. SolidWorks programında ASTM standartlarına uygun şekilde tasarlanan çekme, basma ve üç nokta eğme testi numuneleri STL uzantılı dosya şeklinde kaydedilerek Cura (Ultimaker) dilimleme programına aktarılmıştır. Şekil 2.16'da üç nokta eğme test numunelerinin Cura dilimleme programına aktarılmış görüntüsü örnek olarak verilmiştir.



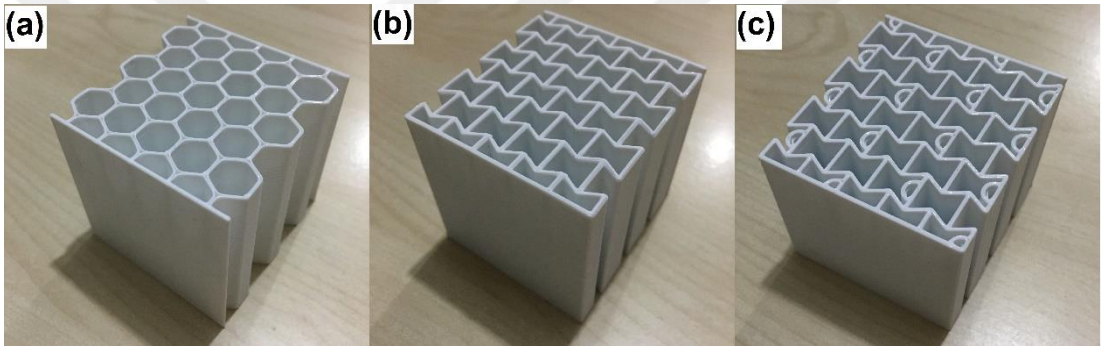
Şekil 2.16: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

Cura programı; tasarlanan parçaların üretimi için doluluk oranı, baskı hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı gibi parametreleri belirlemekte yardımcı olur. Ayrıca Cura programı, üç boyutlu yazıcının baskı alabilmesi için model dosyasını okuyabileceği G-Code uzantılı formata çevirmektedir. Çizelge 2.7'de baskı alınan numunelerin üretim parametreleri gösterilmiştir ve tüm numuneler aynı parametrelere göre üretilmiştir.

Çizelge 2.7: PLA ile baskı alınan numunelerin üretim parametreleri.

Baskı Parametreleri	Değerler
Malzeme	PLA
Nozul çapı (mm)	0.4
Filament çapı (mm)	1,75
Baskı hızı (mm/s)	40
Nozul sıcaklığı (°C)	İlk katman : 220 Sonraki katmanlar 200
Tabla sıcaklığı (°C)	60
Dolgu oranı (%)	100

G-Code uzantısına dönüştürülen çekme,basma ve üç nokta eğme testi numuneleri, üç boyutlu yazıcıya Micro SD kart yardımıyla aktarılmış ve tüm modellerin fiziksel olarak üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.17'de kübik numunelerin farklı modellerdeki imal edilmiş görüntüsü verilmiştir.



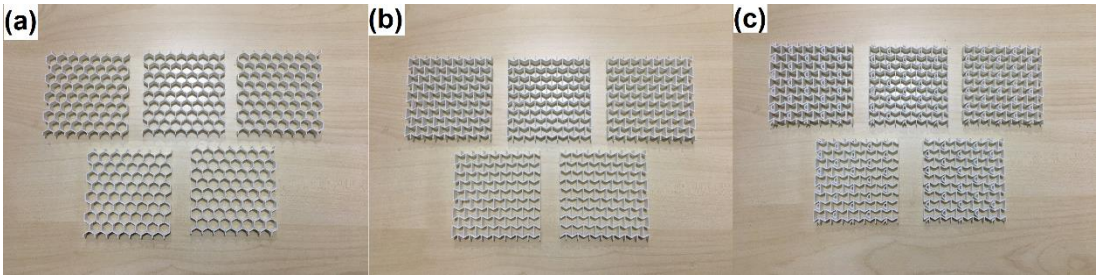
Şekil 2.17: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

Şekil 2.18'de kullanılan PLA malzemesinin karakterizasyonunda kullanılan çekme ve üç nokta eğme testi numunelerinin imal edilmiş görüntüsü verilmiştir.



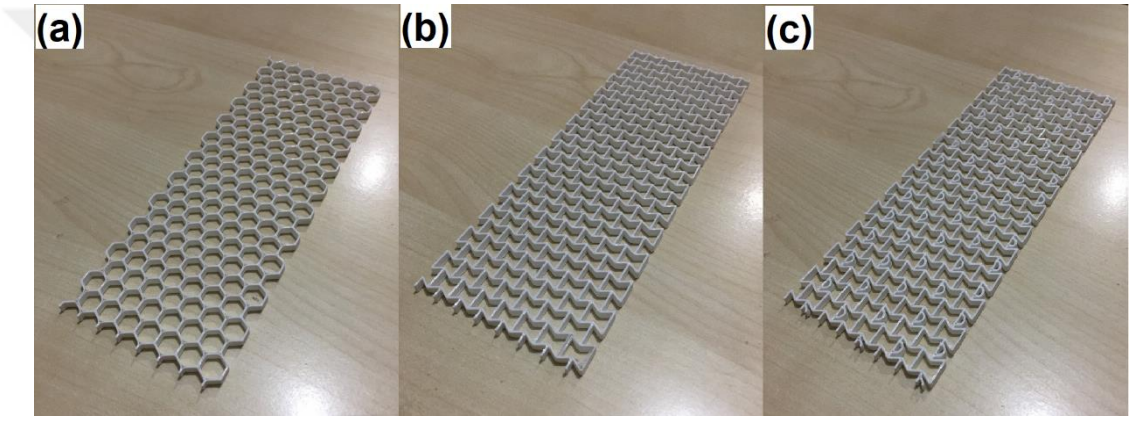
Şekil 2.18: Çekme ve üç nokta eğme testi numunelerinin üretimi.

Şekil 2.19'da çekirdek yapıda kullanılacak basma numunelerinin farklı modellerdeki imal edilmiş görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.19: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

Şekil 2.20'de çekirdek yapıda kullanılacak üç nokta eğme numunelerinin farklı modellerdeki imal edilmiş görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.20: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

2.2.3 Sandviç kompozitlerin üretimi

Üretilen sandviç kompozit numuneler üç bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler çekirdek yapısı, yüzey tabakaları ve reçinedir. Alt ve üst yüzey tabakalarının üretiminde takviye olarak dokuma karbon fiber kumaş, matris malzemesi olarak ise epoksi reçine kullanılmıştır. Sandviç kompozit numunelerin üretim aşamaları sırasıyla alt yüzeye 4 kat karbon fiber kumaş, araya çekirdek yapı ve son olarak üst yüzeye 4 kat karbon fiber kumaş üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Her katmanda karbon fiber kumaş, epoksi-sertleştirici karışımı (ağırlıkça 100:34) ile fırça yardımıyla ıslatılmıştır. Daha sonra numuneler vakum naylonu ile kapatılarak vakuma alınmıştır. Üretilen sandviç kompozitler 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır.

2.3 Mekanik Testler

3B yazıcı ile üretilen PLA malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak test numuneleri ve sandviç kompozit yapıda kullanılacak çekirdek yapıların mekanik özellikleri için statik mukavemetlerinin belirlenebilmesi amacıyla çekme, basma ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 Çekme testi

Çekme testi, çalışmalarda en yaygın ve temel kullanılan mekanik testlerden birisidir. Test yapılacak numunenin kopma noktasına uzatmak için ihtiyaç olan güç ölçülerek malzemenin davranışı hakkında bize bilgi verir. Uzama miktarında elde edilen değerler Denklem 2.1 yardımıyla deformasyonu (ε) bulmak için kullanılmaktadır.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right) = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{2.1}$$

ΔL = Numune boyundaki değişim

L_0 = Numunenin ilk boyu

L = Numunenin son boyu

Numunenin gerilme değeri ise uygulnan yük (P) ve kesit alanı (A_0) oranıdır. Gerilme için mühendislikte kullanılan parametreler Denklem 2.2' de verilmiştir.

$$\sigma = \left(\frac{P}{A_0}\right) \tag{2.2}$$

Numunenin uzunluğundaki başlangıç noktasından itibaren kopana kadar geçen toplam artış, uzamayı gösterir.

Elastikiyet modülü (E), malzemenin sertliği hakkında bilgi verir ve bu özellik katılarda en temel belirleyici özelliklerdendir.

Malzemeler elastik deformasyona uğradığında, deformasyon miktarıyla birlikte aynı zamanda malzemenin boyutu ile de bağlantılıdır. Denklem 2.3' te Elastikiyet modülü gösterilmiştir.

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{2.3}$$

PLA malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen çekme testi numuneleri ASTM D638-4 standardına göre tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Testler 250 kN yük kapasitesine sahip Şekil 2.21' de gösterilen Shimadzu marka AG-X-plus model mekanik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testi için testler 5 numune tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır.



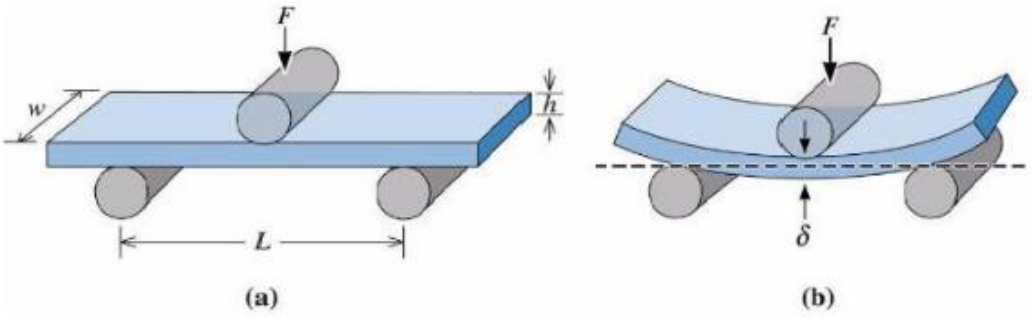
Şekil 2.21: Shimadzu AG-X-plus serisi mekanik test cihazı.

2.3.2 Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi malzemelerin dayanım davranışlarını belirlemede ve malzeme tasarımlarında dayanım kriterlerini oluşturmak için eğme dayanım özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Eğme testi ile elastisite modülü, sehim miktarı, eğme momenti ve eğme gerilmesi gibi mekanik özellikler hesaplanabilmektedir. Numunenin her bölgesinde eğilme momentleri oluşmaktadır. Bu durum eğilme gerilmesi ile doğrudan bağlantılıdır. Eğilme denklemlerinin geçerli olması amacıyla malzemenin Hook kanunlarına uyması gerekmektedir.

Üç nokta eğme testi, dairesel kesitli veya dikdörtgen olacak şekilde test numunesinin yönünü değiştirmeden, iki destek noktasına konumlandırılarak orta noktasına uygulanan kuvvet ile ortaya çıkan şekil değişimini esas almaktadır [130].

Test prosesinde teste tabii tutulan numuneler homojen ve elastik özellikte ise test sırasında maksimum gerilme numunenin dış yüzeyindeki orta bölgede çıkmaktadır. Şekil 2.22' de üç nokta eğme testinin prensibi gösterilmiştir [130].



Şekil 2.22: Üç nokta eğme test prensibi.

Dış yüzeyde oluşan gerilme, yük sehim eğrisinde herhangi bir noktası için Denklem 2.4' e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{2.4}$$

Denkleme göre isterler aşağıda verilmiştir;

σ = Orta nokta kiriş yüzeyindeki gerilme (N/mm^2)

P = Yük sehim eğrisinin herhangi bir noktasındaki kuvvet (N)

L = İki destek arası mesafe (mm)

b = Kiriş genişliği (mm)

d = Kirişin yüksekliği (mm)

Eğilme mukavemeti; numune yüzeyinin orta noktasındaki kırılma momenti, maksimum gerilmeye eşittir. Kuvvet, kırılma momentindeki yüke çıktığı anda Denklem 2.4' ten hesaplanır. Eğer malzeme kırılmaz ise veya tamamen hasar görmez ise eğilme momenti bulunamaz.

Maksimum şekil değiştirme numunenin alt yüzeyinde, desteklerin orta noktasında oluşmaktadır. Maksimum şekil değiştirme Denklem 2.5 ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \tag{2.5}$$

Fakat sandviç yapılar için kullanılan eğilme mukavemetinde kullanılan formül farklıdır. Sandviç kompozit numunelerin eğilme mukavemeti (σf) değerleri Denklem 2.6'da gösterilen ASTM C393 standardına hesaplanmaktadır.

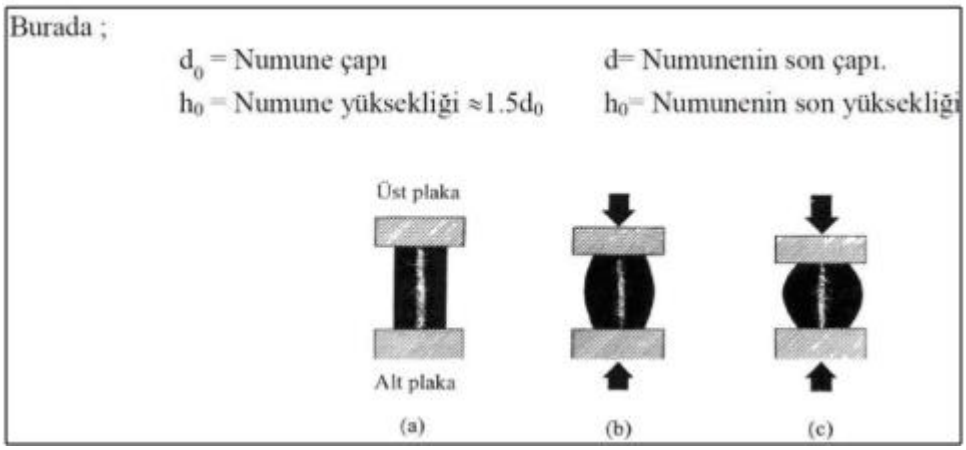
$$\sigma_f = PL/2t(d+c)b \tag{2.6}$$

PLA malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen üç nokta eğme testi numuneleri ASTM D790 standardına, sandviç kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen üç nokta eğme testi numuneleri ASTM C393 standardına göre tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Testler 250 kN yük kapasitesine sahip Şekil 2.21'de gösterilen Shimadzu marka AG-X-plus model mekanik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testi için her standarta göre 5 numune tekrarlı olacak şekilde testler yapılmıştır.

2.3.3 Basma testi

Basma testi, çekme testinin tam tersi olarak kabul edilmektedir. Test sırasında numuneye basma kuvveti uygulanarak yapılmaktadır. Basma kuvvetine maruz kalınan uygulamalarda kullanılan gevrek malzemelerin, mukavemet değerleri basma deneyi ile belirlenmektedir. Bu sebeple basma testinden elde edilen sonuçlar gevrek malzemelerle yapılan tasarımlara doğrudan etki etmektedir. Basma testinde homojen gerilim dağılımı sağlamak için yuvarlak kesitli numuneler tercih edilmektedir. Fakat tasarım şartlarına göre kare veya dikdörtgen kesitli numuneler de basma testinde kullanılmaktadır.

Basma testi; standartlara göre hazırlanan deney numunelerinin belirli bir hızda, tek eksende ve sabit sıcaklıkta, malzeme deforme olunacaya kadar (yük taşıyamaz duruma gelene kadar) basılması işlemidir. Basma testi sırasında mekanik test cihazlarında basma plakaları yardımı ile numuneye kuvvet uygulanmaktadır. Basma testinde numunenin kesiti sürekli arttığından dolayı çekme testinde gözlemlenen boyun verme durumu söz konusu değildir. Sünek malzemelerin basma testleri esnasında örnek uçları ile basma plakaları arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı, fıçı olayı olarak adlandırılan şişme meydana gelmektedir. Basma testine tabii tutulan sünek malzemede fıçı oluşumu Şekil 2.23' te gösterilmektedir.



Şekil 2.23: a) Basma kuvveti yok, b-c) Fıçı oluşumu başlangıcı-tamamlanması.

Basma ve çekme testlerinde malzemelerin plastik deformasyona uğramadan şekil değişimi gösterdiği belirli kuvvet aralığı bulunmaktadır. Malzemelere bu kuvvet aralığında uygulanan yük kaldırıldığında eski formuna tekrar dönmektedir. Elastik bölge olarak adlandırılan bu alan plastik deformasyon denilen bölgeye geçiş yaparken malzemenin maruz kaldığı deformasyon miktarı artışına rağmen uygulanan yük sabit kalmaktadır. Bu geçiş alanında kuvvetin sabit kaldığı ya da eğiminin değişime başladığı bölgeye akma dayanımı denilmektedir. Test sonucunda oluşan grafikte kuvvetin malzeme başlangıç kesit alanına bölünmesiyle elde edilen mukavemet değerine akma mukavemeti adı verilir ve Denklem 2.7'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_a = \frac{P_{Akma}}{A_0} \tag{2.7}$$

Burada;

σ_a = Basmada akma mukavemeti

P_{max} = Basmada akma yükü

A_0 = Numunenin orjinal kesit alanını ifade etmektedir.

Basma testinde numuneye uygulanan kuvvet sürekli bir şekilde artmaktadır. Mekanik test cihazları yük-uzama verilerini test sırasında gelen anlık düşüş (%80 civarında) numunenin kırılma şeklinde hasar gösterdiğini ifade etmektedir. Numunenin hasar almadan dayanabileceği maksimum yük anlamına gelen bu nokta basma dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Bu mukavemet değeri basma testinde elde edilen yük-şekil

değişimi grafiğinde, basma diyagramındaki en yüksek mukavemet değeri olduğu belirtilmektedir. Bu değerler Denklem 2.8'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{A_0} \tag{2.8}$$

Burada;

σ_b = Basma mukavemeti

P_{max} = Basmada maksimum yük

A_0 = Numunenin orjinal kesit alanını ifade etmektedir.

Sandviç kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen basma testi numuneleri ASTM C365 standardına göre tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. Testler 250 kN yük kapasitesine sahip Şekil 2.21'de gösterilen Shimadzu marka AG-X-plus model mekanik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basma testi için her standarta göre 5 numune tekrarlı olacak şekilde testler yapılmıştır.

2.3.4 Poisson oranının hesaplanması

Ek olarak herhangi bir standarta bağlı kalmadan farklı modellere sahip kübik numuneler 3B yazıcıda üretilmiştir. Üretilen bu numuneler basma testine tabii tutulmuştur. Ekstansometre yardımıyla ilgili tasarımların Poisson oranları incelenmiştir [123].

Poisson oranı değerleri Denklem 2.9'de gösterilen formüle göre hesaplanmıştır [113].

$$v_{1,2} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{2.9}$$

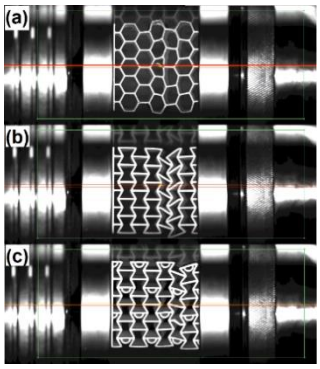
Burada;

$v_{1,2}$ = Poisson oranı

ε_2 = Malzemenin enine gerinim değeri

ε_1 = Malzemenin boyuna gerinim değeri

Şekil 2.24'te farklı tasarıma sahip kübik numunelerin test sırasındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.24: (a) Bal Peteği, (b) Yeniden Girintili, (c) Geliştirilmiş Yeniden Girintili.

2.4 Mekanik Özelliklerin Tespiti İçin Sonlu Elemanlar Analizi

Oksetik ve oksetik olmayan sandviç yapıların davranışını incelemek ve simülasyonlarını gerçekleştirmek için çekirdek malzemenin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Testlerden elde edilen veriler doğrultusunda oksetik ve oksetik olmayan sandviç yapıların sonlu elemanlar modeli oluşturulabilir ve bilgisayar ortamında farklı yükleme durumarında analizler gerçekleştirilebilir. Tez kapsamında sonlu elemanllar analizi Ansys kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Analizini yapmak istenilen problemlerin sayısal çözümlerinin yapılabilmesi için ayrıklaştırılması gerekmektedir. Fiziksel modelleri bütünüyle sonlu elemanlar analizine taşımamız çok zor ve karmaşık olacağından, öncelikle geometrik model üzerinden sadeleştirme yapılmalıdır. Bu, incelenmek istenmeyen veya sonuçlara daha az etkisi olduğu düşünülen parçaların modelden çıkarılması gerektiği anlamına gelir. Ardından, parçaların ağ yapısını oluşturmak gerekir. Aynı zamanda, modelde cıvata, kaynak, perçin gibi bağlantı parçalarının yerine bir boyutlu modeller kullanılabilir ve ağırlıklar yerine noktasal kütleler kullanılabilir. Bu, problemi daha basit hale getirebilir. Modelin ayrıklaştırılmasının temeli, parçalardaki ağ yapılarının oluşturulmasıdır.

Analizler için Ansys Workbench kullanılmıştır. Analizler eğme ve basma deneyinin simülasyonu, ağ yapısı oluşturulması, malzeme özelliklerinin modele yansıtılması, sınır şartlarının belirlenmesi ve analiz sonuç çıktılarının alınmasından oluşmaktadır.

Adımlar doğrultusunda eğme ve basma deneylerinde kullanılan sandviç yapıların bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirilerek Ansys Workbench yazılımında dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak ağ yapıları oluşturulmuştur.

Bal Peteği sandviç yapı, Girintili sandviç yapı ve Yeniden Girintili sandviç yapı için ağ yapısı uygulanmıştır.

Sonraki aşamada malzeme tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Her modelin gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için önemli verilerden biridir. Ansys programı üzerinden çekirdek yapı için termoplastik polilaktik asit malzeme seçilmiştir. Deneysel test sonuçlarına göre sonuçlarına göre elde edilen veriler Ansys programı üzerinden girilerek çekirdek ve plakalara malzeme tanımlaması yapılmıştır. Ağ yapıları sonrasında modellere kuvvet verilerek hasar yükleri ve hasar tipi tespitinde Hoffman hasar analizi kullanılarak statik testler gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR

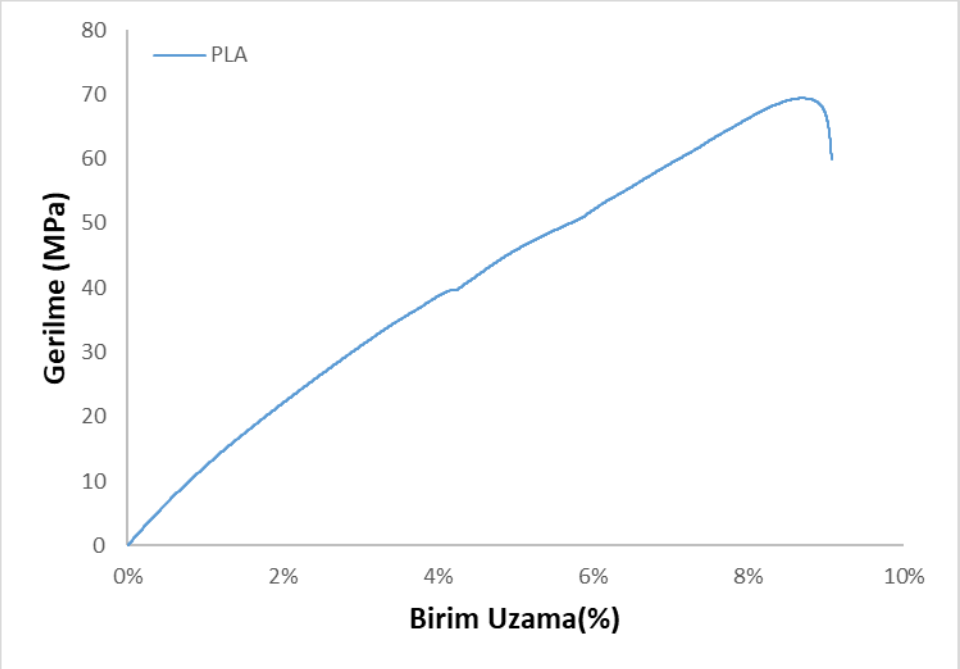
Gerçekleştirilen çalışmalar doğrultusunda kullanılan PLA malzemesinin mekanik değerlerini belirleyebilmek için çekme ve üç nokta eğme testine tabii tutulmuştur.

Sandviç kompozit yapılarda kullanılmak üzere Bal Peteği tasarımı, Yeniden Girintili tasarımı ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili tasarıma sahip sandviç yapıları basma ve üç nokta eğme testlerine tabii tutulmuştur. Çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1 Basılmış PLA Plaka Testleri

3.1.1 Çekme testi

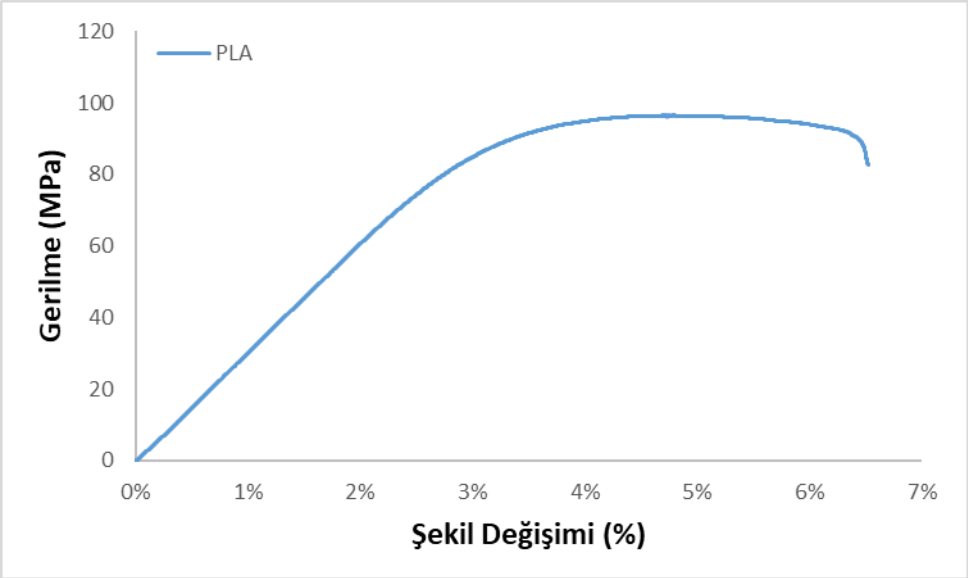
Çekme testi için 3B yazıcıda ASTM D638-4 standardına uygun şekilde PLA malzemesinden imal edilen 5 adet numune test edilmiştir. PLA numunelerin gerilme-birim uzama grafiği Şekil 3.1'de verilmiştir. Sonuçlara göre 69,4 MPa değerinde ortalama çekme dayanımı ile %8,7 kopma uzama değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.1: ASTM D638-4 standardına göre çekme testi sonuç grafiği.

3.1.2 Üç nokta eğme testi

İlk olarak üç nokta eğme testi için 3B yazıcıda ASTM D790 standardına uygun şekilde PLA malzemesinden imal edilen 5 adet numune test edilmiştir. Test sırasında uygulanan kuvvete karşılık gelen şekil değişimi kaydedilmiş ve Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Sonuçlara göre 96,4 MPa değerinde ortalama çekme dayanımı ile %6,5 kopma uzama değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.2: ASTM D790 standardına göre üç nokta eğme testi sonuç grafiği.

3.2 Sandviç Kompozitlerin Mekanik Testleri

3.2.1 Üç nokta eğme testi

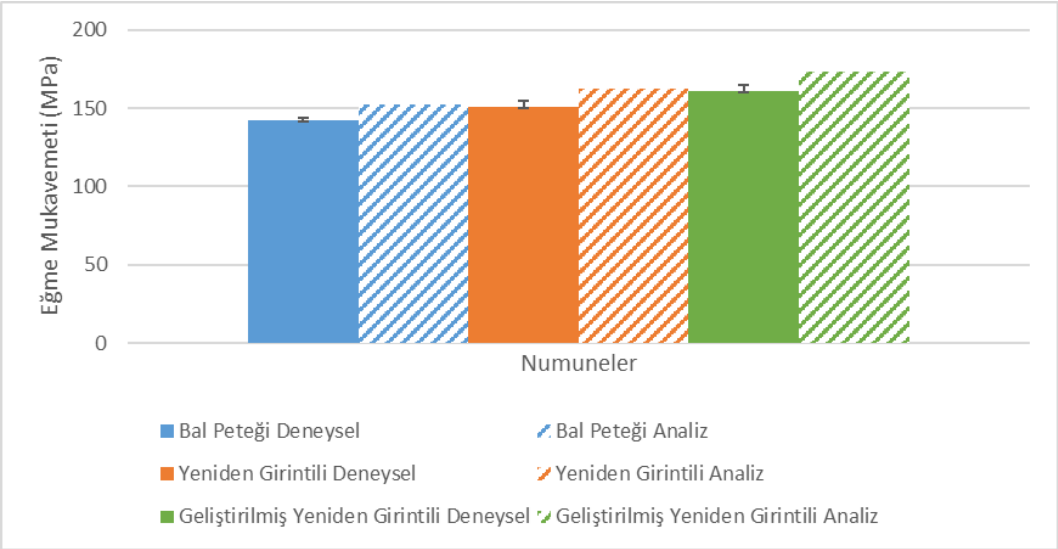
Üç nokta eğme testi için 3B yazıcıda ASTM C393 standardına uygun şekilde PLA malzemesinden imal edilen 5 adet numune test edilmiştir. Testler sırasında yük numuneye R5 mm çapındaki silindir ile uygulanmıştır. Alt mesnet açıklığı 150 mm olarak belirlenmiştir. 3B yazıcı yöntemiyle üretilen farklı çekirdek yapıların alt ve üst yüzeylerine karbon kumaşın epoksi ile yapıştırılmasıyla oluşturulan sandviç kompozitlerin eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Bal Peteği sandviç yapı modeline uygulanan deneysel üç nokta eğme test sonucuna göre ortalama eğme mukavemeti 142,15 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz üç nokta eğme test sonucu ortalama eğme mukavemeti 152,54 MPa olarak tespit edilmiştir.

Yeniden Girintili sandviç yapı modeline uygulanan deneysel üç nokta eğme test sonucuna göre ortalama eğme mukavemeti 150,68 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys

yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz üç nokta eğme test sonucu eğme mukavemeti 162,08 MPa olarak tespit edilmiştir.

Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı modeline uygulanan deneysel üç nokta eğme test sonucuna göre ortalama eğme mukavemeti 160,83 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz üç nokta eğme test sonucu eğme mukameveti 173,41 MPa olarak tespit edilmiştir.

Şekil 3.3'te deneysel testler ve sayısal analizlerin gerçekleştirildiği grafik verilmiştir. Tam dolgulu renk sütunları deneysel test sonuçlarını, taralı renk sütunları ise Ansys analiz programında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarını vermektedir. En yüksek üç nokta eğme mukavemeti negatif Poisson oranına sahip Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıya aittir. Pozitif Poisson oranına sahip Bal Peteği sandviç yapı ise en düşük üç nokta eğme dayanımına sahiptir. Tüm numunelerin standart sapmaları da birbirine oldukça benzerdir. Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıların deneysel ve analiz sonuçları her tasarım için kendi arasında kıyaslandığında sırasıyla %7,31, %7,56 ve %7,82 olarak gözlemlenmiştir. Bu durumda tasarım gerçekleştirilirken kuvvet esnasında stresi dağıtmak amacıyla atılan desteklerin, Poisson oranını negatifte tutarak daha iyi değerler gösterdiği ve sonuçlara pozitif etki sağladığı gözlemlenmektedir. Öztürk yaptığı çalışmada Bal Peteği ile Yeniden Girintili tasarımlardan ürettiği numuneleri üç nokta eğme testine tabii tutmuştur. Yeniden Girintili tasarımı, Bal Peteği tasarımına göre çalışmamıza benzer oranda daha yüksek eğme dayanımına sahip olduğu görülmüştür [131]. Çizelge 3.1'de üç nokta eğme testine ait ortalama deneysel ve sayısal mukavemet değerleri ile standart sapma değerlerine yer verilmiştir.



Şekil 3.3: Üç nokta eğme mukavemet deneysel ve analiz sonuç grafiği.

Çizelge 3.1: Sandviç yapıların üç nokta eğme testi değerleri.

Tasarımlar	Deneysel Üç Nokta Eğme Testi (MPa)	Sayısal Üç Nokta Eğme Testi (MPa)	Standart Sapma
Bal Peteği Sandviç Yapı	142,15	152,54	1,8
Yeniden Girintili Sandviç Yapı	150,68	162,08	3,6
Geliştirilmiş Yeniden Girintili Sandviç Yapı	160,83	173,41	4

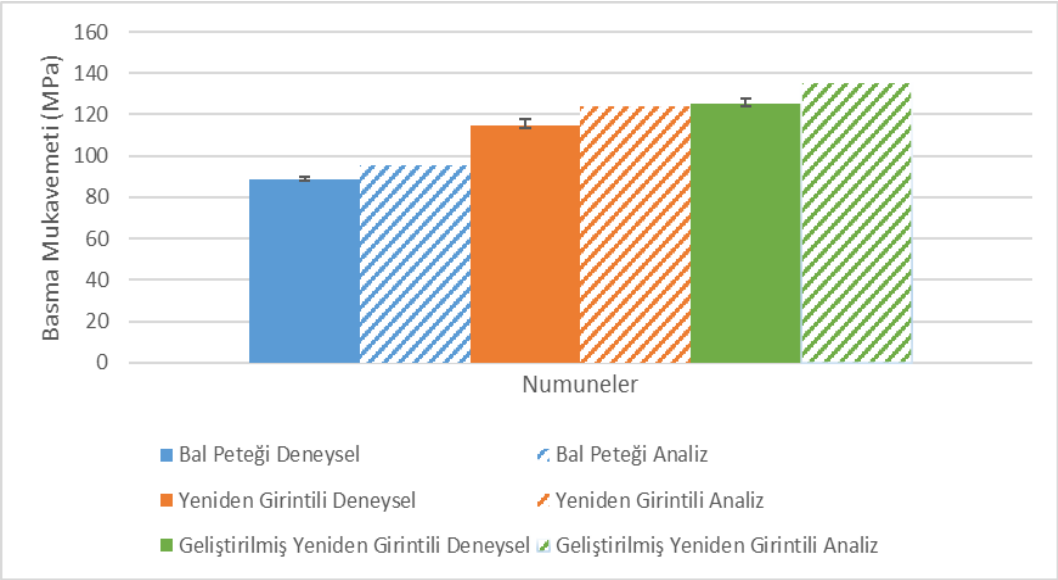
3.2.2 Basma testi

Basma testi için 3B yazıcıda ASTM C365 standardına uygun şekilde PLA malzemesinden imal edilen 5 adet numune test edilmiştir. 3B yazıcı yöntemiyle üretilen farklı çekirdek yapıların alt ve üst yüzeylerine karbon kumaşın epoksi ile yapıştırılmasıyla oluşturulan sandviç kompozitlerin basma testleri gerçekleştirilmiştir. Bal Peteği sandviç yapı modeline uygulanan deneysel basma test sonucuna göre ortalama basma mukavemeti 88,7 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz basma test sonucu basma mukavemeti 95,52 MPa olarak tespit edilmiştir.

Yeniden Girintili sandviç yapı modeline uygulanan deneysel basma test sonucuna göre ortalama basma mukavemeti 114,66 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz basma test sonucu basma mukavemeti 123,87 MPa olarak tespit edilmiştir.

Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı modeline uygulanan deneysel basma test sonucuna göre ortalama basma mukavemeti 125 MPa olarak tespit edilmiştir. Ansys yazılımında gerçekleştirilen sandviç model sonucuna göre elde edilen analiz basma test sonucu basma mukavemeti 135,73 MPa olarak tespit edilmiştir.

Şekil 3.4'te deneysel testler ve sayısal analizlerin gerçekleştirildiği grafik bir arada verilmiştir. Tam dolgulu renk sütunları deneysel test sonuçlarını, taralı renk sütunları ise Ansys analiz programında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarını vermektedir. En yüksek basma mukavemeti negatif Poisson oranına sahip Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıya aittir. Pozitif Poisson oranına sahip Bal Peteği sandviç yapı ise en düşük basma dayanımına sahiptir. Tüm numunelerin standart sapmaları da birbirine oldukça benzerdir. Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapıların deneysel ve analiz sonuçları her tasarım için kendi arasında kıyaslandığında sırasıyla %7,69, %8,03 ve %8,59 olarak gözlemlenmiştir. Bu durumda tasarım gerçekleştirilirken kuvvet esnasında stresi dağıtmak amacıyla atılan desteklerin, Poisson oranını negatifte tutarak daha iyi değerler gösterdiği ve sonuçlara pozitif etki sağladığı gözlemlenmektedir. Öztürk gerçekleştirdiği benzer çalışmada Bal Peteği ile Yeniden Girintili tasarımlardan ürettiği numuneleri basma testine tabii tutmuştur. Yeniden Girintili tasarımı, Bal Peteği tasarımına göre çalışmamıza benzer oranda daha yüksek basma dayanımına sahip olduğu görülmüştür [131]. Çizelge 3.2'de basma testine ait ortalama deneysel ve sayısal mukavemet değerleri ile standart sapma değerlerine yer verilmiştir.



Şekil 3.4: Basma mukavemet deneysel ve analiz sonuç grafiği.

Çizelge 3.2: Sandviç yapıların basma testi değerleri.

Tasarımlar	Deneysel BasmaTesti (MPa)	Sayısal Basma Testi (MPa)	Standart Sapma
Bal Peteği Sandviç Yapı	88,7	95,52	1,3
Yeniden Girintili Sandviç Yapı	114,66	123,87	3,2
Geliştirilmiş Yeniden Girintili Sandviç Yapı	125	135,73	2,6

Herhangi bir standarta bağlı kalmadan farklı modellere sahip kübik numuneler 3B yazıcıda üretilmiştir. Üretilen bu tasarımların Poisson oranlarını belirleyebilmek için universal test cihazında basma testine tabii tutulmuştur. Test sırasında sabit yük altında uzama ölçer (ekstensometre) yardımıyla ölçüm alınmıştır. Test sırasında numunelere uygulanan yük sonucunda yapının enine ve boyuna eksenel gerinme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler Denklem 2.8'de verilen Poisson oranı formülüne göre hesaplanmıştır. Test sonucunda farklı tasarımdaki yapıların Poisson oranları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Oksetik olmayan pozitif Poisson oranında Bal Peteği yapısının 0,5 değere sahip olduğu tespit edilmiştir. Oksetik özellikteki negatif Poisson oranına sahip Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapılar ise sırasıyla

-0,2 ve -0,15 değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapının Yeniden Girintili yapıdan daha yüksek Poisson oranına sahip olmasının sebebi ise hücre içerisindeki desteklerin etkisiyle gerçekleştiği sonucunda varılmıştır. Karaca ve ekibi gerçekleştirdiği çalışmada Yeniden Girintili tasarım için aynı değerde Poisson oranı sonucuna varmıştır [132]. Li ve ekip arkadaşları yürüttüğü çalışmada Bal Peteği tasarımının Poisson değeri, gerçekleştirdiğimiz çalışma sonucundaki Bal Peteği tasarımının Poisson değeri tutarlı bir şekilde benzer çıkmıştır [123].

Çizelge 3.3: Farklı tasarıma sahip yapıların Poisson oranları.

Bal Peteği	Yeniden Girintili	Geliştirilmiş Yeniden Girintili
0,5	-0,2	-0,15

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, PLA malzemesine çekme ve üç nokta eğme testi; Bal Peteği, Yeniden Girintili ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı modellerine üç nokta eğme testi ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Sandviç yapılar Two Trees Bluer FDM tipi üç boyutlu yazıcı yardımıyla üretilmiştir.

Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı 160,83 MPa ile hem deneysel, hem de gerçekleştirilen analize göre 173,41 MPa ile sayısal olarak en iyi üç nokta eğme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel Bal Peteği sandviç yapısı ise hem deneysel, hem de sayısal olarak üç nokta eğme mukavemeti en düşük model olduğu tespit edilmiştir.

Basma testi sonuçlarına göre Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı 125 MPa ile hem deneysel, hem de gerçekleştirilen analize göre 135,73 MPa ile sayısal olarak en iyi basma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Geleneksel Bal Peteği sandviç yapısı ise üç nokta eğme testinde olduğu gibi basma testinde de hem deneysel, hem de sayısal olarak üç nokta eğme mukavemeti en düşük model olduğu tespit edilmiştir.

Poisson oranları incelendiğinde geleneksel Bal Peteği sandviç yapı pozitif Poisson oranına, Yeniden Girintili sandviç ve Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapılar ise negatif Poisson oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilmiş Yeniden Girintili yapının Yeniden Girintili yapıdan daha yüksek Poisson oranına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun en temel sebebi ise hücre içerisindeki yarım dairesel desteklerin etkisiyle gerçekleştiği sonucunda varılmıştır.

Yapılan deneysel testler ve sayısal analizler sonucunda en iyi modelin Geliştirilmiş Yeniden Girintili sandviç yapı olduğu tespit edilmiştir. Sandviç yapıların mekanik özelliklerinin hücresel yapılar ile ilişkili olduğu görülmüştür.

Eklemeli imalat yöntemi yardımıyla imal edilmesi olanaksız tüm hücre yapı modelleri bu yöntem ile üretilebilmektedir. Üretilecek olan sandviç yapılar için ön tasarım adımları hızlı, düşük maliyetli ve kolay değiştirilebilen bir araç olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Tez çalışması sonrası ilerleyen süreçte yapılabilecek öneriler şu şekilde olabilir.

Yeniden girintili tasarımda çift yönlü negatif Poisson oranının sağlanabileceği ve bu şekilde balistik malzemelerde kullanılabileceği incelenebilir.

Kompozit yapılara çekme testi uygulanabilir.

Sandviç yapılar üretildikten sonra çekirdek malzemede bulunan hücresel yapılara ne kadar miktarda reçine dolduğu tespit edilebilir.

Sandviç kompozit yapı elde edilirken çekirdek malzemesinin alt ve üst yüzeyine karbon fiber serilerek üretilmiştir. Alt ve üst yüzeyde kullanılan kuru karbon fiber reçine ile ıslatılmıştır. Sonraki çalışmalarda prepreg elyaf ile üretim gerçekleştirilebilir. Fakat bunun için çekirdek malzemenin daha yüksek sıcaklıklara dayanım sağlaması gerekmektedir. Bu yüzden çekirdek yapı için alternatif malzemeler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Ju, J. and J.D. Summers (2011). Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain. *Materials & Design, 32* (2), 512-524.

[2] Chawla, K.K. (2019). Ceramic Matrix Composites. *Composite Materials: Science and Engineering*, 251-296.

[3] Costanza, G., D. Solaiyappan, and M.E. Tata. (2023). Properties, Applications and Recent Developments of Cellular Solid Materials: A Review. *Materials, 16* (22), 7076.

[4] Schaedler, T.A. and W.B. Carter. (2016). Architected cellular materials. *Annual Review of Materials Research, 46*, 187-210.

[5] Brendon Francisco, M., et al. (2023). Design optimization of a sandwich composite tube with auxetic core using multiobjective lichtenberg algorithm based on metamodelling. *Engineering Structures, 281*, 115775.

[6] Papadopoulou, A., J. Laucks, and S. Tibbits. (2017). Auxetic materials in design and architecture. *Nature Reviews Materials, 2* (12), 1-3.

[7] Ahmed, W., et al. (2021). Mechanical performance of three-dimensional printed sandwich composite with a high-flexible core. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 235* (6), 1382-1400.

[8] Shanmugam, V., et al. (2021). Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue, 143*, 106007.

[9] Deshpande, V., M. Ashby, and N. Fleck. (2001). Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta materialia, 49* (6), 1035-1040.

[10] Zhu, F., et al. (2010). Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores. *International Journal of Protective Structures, 1* (4), 507-541.

[11] Birman, V. and G.A. Kardomateas. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering 142*, 221-240.

[12] Castanie, B., C. Bouvet, and M. Ginot. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access, 1,* 100004.

[13] Shekar, H.S. and M. Ramachandra. (2018). Green composites: a review. *Materials Today: Proceedings, 5* (1), 2518-2526.

[14] Hsissou, R., et al. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures, 262*, 113640.

[15] Nazrin, A., et al. (2020). Nanocellulose reinforced thermoplastic starch (TPS), polylactic acid (PLA), and polybutylene succinate (PBS) for food packaging applications. *Frontiers in chemistry, 8*, 213.

[16] Diyana, Z., et al. (2021). Physical properties of thermoplastic starch derived from natural resources and its blends: a review. *Polymers, 13* (9), 1396.

[17] Wang, F., et al. (2019). Tourmaline-modified FeMnTiO x catalysts for improved low-temperature NH3-SCR performance. *Environmental science & technology, 53* (12), 6989-6996.

[18] Piao, Y., et al. (2020). Identify Zr promotion effects in atomic scale for co-based catalysts in Fischer–Tropsch synthesis. *ACS Catalysis, 10* (14), 7894-7906.

[19] Elanchezhian, C., et al. (2018). Review on mechanical properties of natural fiber composites. *Materials Today: Proceedings, 5* (1), 1785-1790.

[20] Mohd Nurazzi, N., et al. (2021). Fabrication, functionalization, and application of carbon nanotube-reinforced polymer composite: An overview. *Polymers, 13* (7), 1047.

[21] Sapuan, S., et al. (2020). Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites. *Polymers, 12* (10), 2211.

[22] Bradley, W. and T. Grant. (1995). The effect of the moisture absorption on the interfacial strength of polymeric matrix composites. *Journal of materials science, 30*, 5537-5542.

[23] Heshmati, M. (2017). *Durability and long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints.* Chalmers Tekniska Hogskola, Sweden.

[24] Nagavally, R.R. (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng, 5* (9), 82-87.

[25] Ali, H. and M.A. Wahab. (2015). History of adhesive composite joints. *Joining Composites with Adhesives: Theory and Applications*, 1-14.

[26] Thippesh, L. (2018). Fabrication of Hybrid Composite Mono-Leaf Spring with Unidirectional Glass Fibers. *Materials Today: Proceedings, 5* (1), 2980-2984.

[27] Rajak, D.K., et al. (2019). Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Polymers, 11* (10), 1667.

[28] Prakash, S. (2019). Experimental investigation of surface defects in low-power CO2 laser engraving of glass fiber-reinforced polymer composite. *Polymer Composites, 40* (12), 4704-4715.

[29] Chalmers, D. (1991). Experience in design and production of FRP marine structures. *Marine structures, 4* (2), 93-115.

[30] Muhammad, A., et al. (2021). Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. *Advances in Sustainable Polymer Composites*, 185-207.

[31] Zhang, J.Z. (2013). Study on carbon fiber composite materials in sports equipment. *Applied Mechanics and Materials, 329*, 105-108.

[32] Kesarwani, S. (2017). Polymer composites in aviation sector. *Int. J. Eng. Res, 6* (10).

[33] Harussani, M.M., et al. (2022). Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review. *Defence Technology, 18* (8), 1281-1300.

[34] Rubino, F., et al. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering, 8*, 26.

[35] Yao, J., Z. Zhou, and J. Tang. (2015). *Composite material for highway engineering and its application*. Hunan University Press, Changsha.

[36] Zhou, M.Y., et al. (2020). Progress in research on hybrid metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds, 838*, 155274.

[37] S, S.K., et al. (2022). Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings, 50*, 1022-1031.

[38] Rai, R.N., et al. (2006). A study on the machinability behaviour of Al–TiC composite prepared by in situ technique. *Materials Science and Engineering: A, 428* (1-2), 34-40.

[39] Shokrani, A., V. Dhokia, and S.T. Newman. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57*, 83-101.

[40] Mussatto, A., et al. (2021). Advanced production routes for metal matrix composites. *Engineering reports, 3* (5), e12330.

[41] Bhoi, N.K., H. Singh, and S. Pratap. (2020). Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles–a review. *Journal of Composite Materials, 54* (6), 813-833.

[42] Miracle, D. (2005). Metal matrix composites–from science to technological significance. *Composites science and technology, 65* (15-16), 2526-2540.

[43] Surappa, M.K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana, 28*, 319-334.

[44] Nturanabo, F., L. Masu, and J.B. Kirabira. (2019). Novel applications of aluminium metal matrix composites. *Aluminium alloys and composites*.

[45] Moona, G., et al. (2018). Aluminium metal matrix composites: A retrospective investigation. *Indian Journal of Pure and Applied Physics, 56*, 164-175.

[46] Chawla, K.K. and K.K. Chawla. (2012)**.** Ceramic matrix composites. *Composite Materials: Science and Engineering*, 249-292.

[47] Sauder, C. (2014). Ceramic matrix composites: nuclear applications. *Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology*, 609-646.

[48] Dhanasekar, S., et al. (2022). A Comprehensive Study of Ceramic Matrix Composites for Space Applications. *Advances in Materials Science and Engineering, 2022* (1), 6160591.

[49] Schmidt, S., et al. (2004). Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications. *Acta Astronautica, 55* (3-9), *4*09-420.

[50] Kaya, H. (1999). The application of ceramic-matrix composites to the automotive ceramic gas turbine. *Composites Science and Technology*, *59* (6), 861-872.

[51] Halbig, M., et al. (2013). Evaluation of ceramic matrix composite technology for aircraft turbine engine applications. *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 539.

[52] Karadimas, G. and K. Salonitis. (2023). Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review. *Applied Sciences, 13* (5), 3017.

[53] Gadow, R. and M. Speicher. (2012). Manufacturing of ceramic matrix composites for automotive applications. *Ceramic Transactions, 128*, 25-41.

[54] Demir, B., L.C. Henderson, and T.R. Walsh. (2017). Design Rules for Enhanced Interfacial Shear Response in Functionalized Carbon Fiber Epoxy Composites. *ACS Applied Materials & Interfaces, 9* (13), 11846-11857.

[55] Godara, A., et al. (2010). Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology, 70* (9), 1346-1352.

[56] Behera, A., et al. (2018). Tensile and Failure Behavior of Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composite Exposed to Different Environmental Conditions. *Materials Today: Proceedings, 5* (9), 20250-20256.

[57] Xu, Y., D. Chung, and C. Mroz. (2001). Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, *32* (12), 1749-1757.

[58] Polat, B. (2019). *Cam takviyeli polimer matrisli termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

[59] Dang, Z.-M., et al. (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites. *Progress in Materials Science*, *57* (4), 660-723.

[60] Mallick, P. (2017). *Processing of polymer matrix composites*. CRC Press.

[61] Di Maida, P., et al. (2018). Effects of nano-silica treatment on the flexural post cracking behaviour of polypropylene macro-synthetic fibre reinforced concrete. *Mechanics Research Communications*, *88*, 12-18.

[62] Clyne, T.W. and D. Hull. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.

[63] Balasubramanian, M. (2014). *Composite materials and processing, 711*, CRC press Boca Raton.

[64] Wei, C., D. Esposito, and K. Tauer. (2016). Thermal properties of thermoplastic polymers: Influence of polymer structure and procedure of radical polymerization. *Polymer Degradation and Stability*, *131*, 157-168.

[65] van Rijswijk, K. and H.E.N. Bersee. (2007). Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *38* (3), 666-681.

[66] Jogur, G., et al. (2018). Impact properties of thermoplastic composites. *Textile Progress, 50* (3), 109-183.

[67] Bîrcă, A., et al. (2019). Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers. *Materials for biomedical engineering*, 1-28.

[68] Massy, J. and J. Massy. (2017). Thermoplastic and thermosetting polymers. *A Little Book about BIG Chemistry: The Story of Man-Made Polymers*, 19-26.

[69] Pascault, J.P. and R.J. Williams. (2013). Thermosetting polymers. *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing*, 519-533.

[70] Cheremisinoff, N.P. and P.N. Cheremisinoff. (2020). *Elastomer technology handbook*. CRC press.

[71] Visakh, P., et al. (2012). General Purpose Elastomers: Structure, Chemistry, Physics and Performance. *Advances in elastomers*, 11-45

[72] Evlen, H., M.A. Özdemir, and A. ÇALIŞKAN. (2019). Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, *22* (4), 1031-1037.

[73] Aydın, M., B. Güler, and K. Çetinkaya. (2018). Dikey ekstrüzyon (filament) sistemi tasarim ve prototip imalati. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, *2* (1), 1-10.

[74] Kruth, J.-P., M.-C. Leu, and T. Nakagawa. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, *47* (2), 525-540.

[75] Çelik, D. and K. Çetinkaya. (2016). Üç boyutlu Yazici Tasarimlari, Prototipleri Ve Ürün Yazdirma Karşilaştirmalari. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, *5* (2).

[76] Azari, A. and S. Nikzad. (2009). The evolution of rapid prototyping in dentistry: a review. *Rapid Prototyping Journal*, *15* (3), 216-225.

[77] Kayacan, M.C., et al. (2018). Monitoring the osseointegration process in porous Ti6Al4V implants produced by additive manufacturing: an experimental study in sheep. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, *16* (2), 68-75.

[78] Wang, J., et al. (2016). Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *International journal of pharmaceutics*, *503* (1-2), 207-212.

[79] Melchels, F.P., J. Feijen, and D.W. Grijpma. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, *31* (24), 6121-6130.

[80] Baş, H. and F. Yapıcı. (2015). ERGONOMİK TASARIM VE ÜRETİMDE HIZLI PROTOTİPLEME TEKNOLOJİSİ. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *3* (3), 199-204.

[81] Chia, H.N. and B.M. Wu. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of biological engineering*, *9*, 1-14.

[82] Arcaute, K., B.K. Mann, and R.B. Wicker. (2006). Stereolithography of three-dimensional bioactive poly (ethylene glycol) constructs with encapsulated cells. *Annals of biomedical engineering*, *34*, 1429-1441.

[83] Arcaute, K., B. Mann, and R. Wicker. (2010). Stereolithography of spatially controlled multi-material bioactive poly (ethylene glycol) scaffolds. *Acta biomaterialia*, *6* (3), 1047-1054.

[84] Novakova-Marcincinova, L. and J. Novak-Marcincin. (2012). Testing of materials for rapid prototyping fused deposition modelling technology. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, *6* (10), 2082-2085).

[85] Groth, C., et al. (2014). Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod, 48*, 475-85.

[86] Wang, X., et al. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, *110*, 442-458.

[87] Sood, A.K., R.K. Ohdar, and S.S. Mahapatra. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, *31* (1), 287-295.

[88] Boschetto, A. and L. Bottini. (2014). Accuracy prediction in fused deposition modeling. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *73*, 913-928.

[89] Campanelli, S.L., et al. (2010). Capabilities and performances of the selective laser melting process. *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, *1* (1), 233-252.

[90] Trosch, T., et al. (2016). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials letters*, *164*, 428-431.

[91] Pang, K.W. (2001). *A process planning and optimization system for laminated object manufacturing application,* Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.

[92] Çelik, İ., et al. (2013). Hizli prototipleme teknolojileri ve uygulama alanlari. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 53-70.

[93] Chiu, Y., Y. Liao, and C. Hou. (2003). Automatic fabrication for bridged laminated object manufacturing (LOM) process. *Journal of Materials Processing Technology*, *140* (1-3), 179-184.

[94] Mouzakis, D.E. (2018). Advanced technologies in manufacturing 3D-layered structures for defense and aerospace. *Lamination-theory and application*, 74331.

[95] Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, *60* (5), 677-688.

[96] Yıldırım, G., S. Yıldırım, and E. Çelik. (2018). Yeni bir bakış-3 boyutlu yazıcılar ve öğretimsel kullanımı: Bir içerik analizi. *Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi, 13* (25), 163-184.

[97] Saleh Alghamdi, S., et al. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, *13* (5), 753.

[98] Ramya, A. and S.L. Vanapalli. (2016). 3D printing technologies in various applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, *7* (3), 396-409.

[99] Hamad, K., et al. (2015). Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *Express polymer letters*, *9* (5).

[100] Takayama, T., M. Todo, and H. Tsuji. (2011). Effect of annealing on the mechanical properties of PLA/PCL and PLA/PCL/LTI polymer blends. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, *4* (3), 255-260.

[101] Benninga, H. (1990). A history of lactic acid making: a chapter in the history of biotechnology. *Springer Science & Business Media*, *11*.

[102] Holten, C.H. (1971). *Lactic acid. Properties and chemistry of lactic acid and derivatives*. Weinheim/Bergstr., W. Germany, Verlag Chemie GmbH.

[103] Mehta, R., et al. (2005). Synthesis of poly (lactic acid): a review. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, *45* (4), 325-349.

[104] Garlotta, D. (2001). A literature review of poly (lactic acid). *Journal of Polymers and the Environment*, *9*, 63-84.

[105] Masutani, K. and Y. Kimura. (2014). PLA synthesis. From the monomer to the polymer. *Poly(lactic acid) Science and Technology*, 1.

[106] Avérous, L. (2008). Chapter 21 - Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, 433-450.

[107] Hartmann, M. (1998). High molecular weight polylactic acid polymers. *Biopolymers from renewable resources*, 367-411.

[108] Valerga, A.P., et al. (2018). Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*, *11* (8), 1322.

[109] Farah, S., D.G. Anderson, and R. Langer. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *107*, 367-392.

[110] Chhabra, M. and R. Singh. (2011). Rapid casting solutions: a review. *Rapid Prototyping Journal*.

[111] Uzun, M. (2010). NEGATİF POİSSON ORANINA SAHİP (AUXETIC) MALZEMELER VE UYGULAMA ALANLARI. *Tekstil ve Mühendis, 17* (77), 13-18.

[112] Lakes, R. (1993). Advances in negative Poisson's ratio materials. *Wiley Online Library*, *47*, 63-81.

[113] Karaca, A.A. (2016). *Auxetic malzemelerin deneysel olarak ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi* (Yüksek Lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[114] Kinney, J., et al. (2004). Resonant ultrasound spectroscopy measurements of the elastic constants of human dentin. *Journal of biomechanics, 37* (4), 437-441.

[115] Evans, K.E., et al. (1991). Molecular network design. *Nature*, *353*, 124-124.

[116] Lakes, R. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, *235* (4792), 1038-1040.

[117] Ovat Can, H. (2017). *Akıllı malzemelerin mekanik özellikleri* (Yüksek lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[118] Aksu, U. and M.S. Tatlıer. (2018). An investigation on auxetic feature and its applications. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *2* (2), 167-176.

[119] Chang, Y., P. Ma, and G. Jiang. (2017). Energy absorption property of warp-knitted spacer fabrics with negative Possion's ratio under low velocity impact. *Composite Structures*, *182*, 471-477.

[120] Quan, C., et al. (2020). 3d printed continuous fiber reinforced composite auxetic honeycomb structures. *Composites Part B: Engineering*, *187*, 107858.

[121] Hou, S., et al. (2018). Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Materials & Design*, *160*, 1305-1321.

[122] Li, T., F. Liu, and L. Wang. (2020). Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials. *Composites Part B: Engineering*, *198*, 108229.

[123] Li, T., et al. (2018). Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials & design*, *142*, 247-258.

[124] Lvov, V., et al. (2020). Design and mechanical properties of 3D-printed auxetic honeycomb structure. *Materials Today Communications*, *24*, 101173.

[125] Kaveloglu, S. and S. Temiz. (2022). An experimental and finite element analysis of 3D printed honeycomb structures under axial compression *Polymers and Polymer Composites* (Vol. 30, pp. 09673911221122333).

[126] Günay, M., et al. (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, *23* (1), 73-79.

[127] Kaygusuz, B. and S. Özerinç. (2018). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, *16* (1), 1-6.

[128] Hassan, A.K.F. and O.A. Abdullah. (2015). New methodology for prestressing fiber composites. *Univers. J. Mech. Eng*, *3* (6), 252-261.

[129] Bedeloğlu, A., et al. (2024). The flexural and compressive properties of sandwich composites with different 3D-printed core structures. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, *4* (1), 98-112.

[130] Askeland, D.R., et al. (2003). Mechanical testing and properties. *The science and engineering of materials*, 63-80.

[131] Bahadır, O. (2020). *3 boyutlu yazıcı ile üretilen sandviç yapıların statik ve dinamik yük altında davranışlarının incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[132] Karaca, A.A. (2016). *Auxetic malzemelerin deneysel olarak ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Emre DEMİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Lif ve Polimer Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Polimer Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- **Kompozit İmalat Mühendisi** **:** 2021-Devam ediyor, Baykar Teknoloji

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Demir, E. & Bedeloğlu, A. (2024). Development of Auxetic Composite Materials. *14th International Fiber and Polymer Research Symposium (14th ULPAS)*, (s. 192). Bursa : Proceeding Book of 14th ULPAS 2024: May 24-25.

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Demir, E. & Bedeloğlu, A. et al. (2021). WEARABLE TEXTILE-BASED PIEZOELECTRIC NANOGENERATORS WITH GRAPHENE/ZNO/AgNW. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, *22*(8th ULPAS-Special Issue 2021), 59-69.

Demir, E., Duygun, İ. K., & Bedeloğlu, A. (2024). The Mechanical Properties of 3D-Printed Polylactic Acid/Polyethylene Terephthalate Glycol Multi-Material Structures Manufactured by Material Extrusion. *3D Printing and Additive Manufacturing, 11*(1), 197-206.