

**BAL PETEĞİ ÇEKİRDEKLİ POLİÜRETAN KÖPÜK DOLGULU SANDVIÇ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Erdem TUNCA

Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haşim KAFALI

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2022

17/06/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Erdem TUNCA, BAL PETEğİ ÇEKİRDEKLİ POLİÜRETAN KÖPÜK DOLGULU SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Haşim KAFALI

ÖZET

BAL PETEĞİ ÇEKİRDEKLİ POLİÜRETAN KÖPÜK DOLGULU SANDVİÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Erdem TUNCA

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haşim KAFALI

Hava aracı yapılarında kullanılan sandviç kompozitlerde genellikle çekirdek malzemesi olarak bal peteği yapılar kullanılmaktadır. Bal peteği yapılarının uçakların yapısal bileşenleri için kullanıldığında bazı dezavantajları bulunmaktadır. Polimer köpük çekirdekli yapılar kullanıldığında da çekirdekte meydana gelen çatlaklar süratle tüm çekirdek yapısı boyunca yayılmaktadır.

Bu çalışmada bal peteği çekirdekli yapılar ve polimerik köpük çekirdekli yapıların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için potansiyel bir malzeme olarak poliüretan köpük – bal peteği yapı kombinasyonu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında çekirdek malzeme olan bal peteği yapı üç boyutlu yazıcı kullanılarak polilaktik asit filamentlerden (PLA) üretilmiştir. Üretilen bal peteği yapı poliüretan köpük ile doldurulup elde edilen nihai çekirdek yapısı, yüz malzemesi olan karbonfiber ve epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemi ile sandviç kompozit formuna getirilmiştir. Karbonfiber/epoksi yüz malzemesi plain dokumaya sahip karbonfiber kumaşların 0°/90° yöneliminde vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen sandviç kompozit düzlem içi basma, üç nokta eğme, kayma/kesme (shear) ve nem emilimi testlerine tabii tutulmuştur. Poliüretan köpük dolgusunun yapının mekanik dayanımına olan katkısı ve nem emilim özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Havacılık, Sandviç kompozit, Eklemeli imalat, Bal peteği çekirdek, Poliüretan köpük.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYURETHANE FOAM FILLED HONEYCOMB CORE SANDWICH COMPOSITES

Erdem TUNCA

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Haşim KAFALI

Honeycomb structures are generally used as core material in sandwich composites used in aircraft structures. Honeycomb structures have some disadvantages when used for structural components of aircraft. Even when polymer foam core structures are used, the cracks that occur in the core rapidly spread throughout the entire core structure.

In this study, polyurethane foam – honeycomb structure combination was used as a potential material in order to eliminate the disadvantages of honeycomb core structures and polymeric foam core structures. Within the scope of the study, the honeycomb structure, which is the core material, was produced from polylactic acid filaments (PLA) using a three-dimensional printer. The produced honeycomb structure was filled with polyurethane foam and the final core structure was formed into sandwich composite form by vacuum infusion method using carbon fiber and epoxy resin, which is the facesheet material. Carbon fiber/epoxy facesheet material is produced by using vacuum infusion method in $0^{\circ}/90^{\circ}$ orientation of plain weave carbonfiber fabrics. The produced sandwich composite was subjected to edgewise compression, three-point bending, shear and moisture absorption tests. The contribution of polyurethane foam filling to the mechanical strength of the structure and its effects on moisture absorption properties were investigated.

Keywords: Aeronautics, Sandwich composite, Additive manufacturing, Honeycomb, Polyurethane foam.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca desteğini, ilgisini ve bilgisini hiç esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Haşim KAFALI'ya,

Tez çalışmasında sandviç kompozit üretimi esnasında yardımlarını ve imkanlarını esirgemeyen Avrasya Rüzgar şirketi genel müdürü Sayın Oğulcak Buğra AKBIYIK'a ve Avrasya Rüzgar ekibine, poliüretan köpük bileşenlerinin temini konusunda destek sağlayan Pluskim firmasına, epoksi reçine temini konusunda destek sağlayan Duratek firmasına,

Çalışmalarım esnasında her zaman destek olan ve motive olmamı sağlayan çalışma arkadaşlarım Ünzile GÜVEN ve Cankara AKBULUT'a,

Tüm hayatım boyunca yanımda olup beni bugünlere getiren annem, babam ve abime teşekkürü bir borç bilirim.

Erdem TUNCA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Erdem TUNCA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırma Problemi	10
1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefi	11
1.3. Çalışmanın Yöntemi	11
2. EKLEMELİ İMALAT	13
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Malzeme Üretimi	15
2.2. Eklemeli İmalat Tekniklerinin Sınıflandırılması	17
2.2.1. Toz yataklı füzyon sistemleri.....	18
2.2.1.1. Seçici lazer sinterleme (SLS).....	19
2.2.1.2. Seçici lazer eritme (SLM)	19
2.2.1.3. Elektron ışını ile eritme (EBM).....	20
2.2.1.4. Seçici ısı sinterleme (SHS)	20
2.2.2. Levha laminasyonu.....	20
2.2.2.1. Ultrasonik eklemeli imalat	21
2.2.2.2. Lamine nesne üretimi	21
2.2.3. Bağlayıcı püskürtme.....	22

2.2.4. Tekne fotopolimerizasyonu	24
2.2.4.1. Stereolitografi (SLA)	25
2.2.4.2. Dijital ışık işleme (DLP)	26
2.2.4.3. Sürekli dijital ışık işleme/Sürekli sıvı arayüz üretimi (CDLP/CLIP).....	27
2.2.5. Yönlendirilmiş enerji biriktirme.....	27
2.2.6. Malzeme püskürtme.....	29
2.2.7. Malzeme ekstrüzyonu	31
2.3. FDM/FFF Tekniğinin Gelişim Süreci.....	32
2.4. FDM/FFF Tekniğinde Kullanılan Malzemeler	34
2.5. FDM/FFF Tekniğinde Baskı Kalitesini Etkileyen Faktörler	36
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	39
3.1. FDM Tekniği Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Yapılar ile İlgili Yapılan Çalışmalar	39
3.2. Polimerik Köpük Dolgulu Bal Peteği Sandviç Yapılar ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	44
4. MATERYAL VE METOD	49
4.1. Bal Peteği Çekirdeklerin Tasarımı	49
4.2. Üç Boyutlu Yazıcı ile Bal Peteği Çekirdeklerin Üretimi	49
4.3. Bal Peteği Çekirdek Yapıların Poliüretan Köpük ile Doldurulması.....	52
4.4. Poliüretan Köpük Dolgulu Bal Peteği Çekirdeklerin Uygun Forma Getirilmesi.....	54
4.5. Sandviç Kompozitin Üretimi.....	55
4.6. Üretilen Sandviç Kompozitlere Uygulanan Testler	58
4.6.1. Düzlem içi basma testi (edgewise compression).....	58
4.6.2. Üç nokta eğme testi.....	59
4.6.3. Kesme (shear) testi	60
4.6.4. Su emilim testi.....	61
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	62
5.1. Düzlem İçi Basma (Edgewise Compression) Testi Sonuçları.....	62

5.1.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların düzlem içi basma testi sonuçları.....	62
5.1.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların düzlem içi basma testi sonuçları.....	66
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	69
5.2.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların üç nokta eğme testi sonuçları	69
5.2.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların üç nokta eğme testi sonuçları.....	74
5.3. Kesme (Shear) Testi Sonuçları.....	78
5.3.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların kesme testi sonuçları	78
5.3.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların kesme testi sonuçları.....	81
5.4. Su Emilimi Testi Sonuçları.....	83
5.4.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların su emilimi testi sonuçları	83
5.4.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların su emilimi testi sonuçları.....	84
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	85
KAYNAKÇA.....	87
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Üretim esnasında kullanılan PLA filamentin özellikleri	50
Tablo 4.2. Bal peteği yapıların üretimi için ayarlanan parametreler.....	50
Tablo 4.3. Poliüretan köpük üretiminde kullanılan poliöl ve izosiyanatın fiziksel özellikleri	52
Tablo 4.4. Poliüretan köpük üretimi için reaksiyon özellikleri.....	52
Tablo 4.5. Sandviç kompozit üretiminde kullanılan karbonfiber kumaşa ait özellikler	56
Tablo 4.6. Sandviç kompozitlerin üretiminde kullanılan yüz malzemesi ve çekirdek malzemeler	56
Tablo 5.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitin düzlem içi basma testi sonuçları	64
Tablo 5.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitin düzlem içi basma testi sonuçları	68
Tablo 5.3. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip yapı için eğilme özellikleri.....	72
Tablo 5.4. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip yapı için eğilme özellikleri	76
Tablo 5.5. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin kesme testine ait dayanım değerleri.....	80
Tablo 5.6. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin kesme testine ait dayanım değerleri	83
Tablo 5.7. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde su emilimi testi sonra meydana gelen yüzdece ağırlık artışları	84
Tablo 5.8. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde su emilimi testi sonra meydana gelen yüzdece ağırlık artışları	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Boeing 787 uçağına ait malzeme kullanım oranları	1
Şekil 1.2. Airbus A380 uçağında yer alan sandviç kompozit uygulamaları.....	2
Şekil 1.3. Sandviç kompoziti oluşturan bileşenler	3
Şekil 1.4. Bal peteği yapı için hücre duvarının gösterimi	4
Şekil 1.5. Bal peteği yapıya uygulanan kuvvet türlerinin gösterimi	5
Şekil 1.6. Alüminyum ve aramid bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapılarda meydana gelen yaygın hatalar.....	5
Şekil 1.7 Bal peteği yapılarda karşılaşılan yaygın hata türleri	6
Şekil 1.8. Üç nokta eğme testi altında meydana gelen hasarlar; (I) çekirdek - üst yüz delaminasyonu, (II) çekirdek boyunca çatlağın ilerlemesi, (III) çekirdek - alt yüz delaminasyonu	9
Şekil 1.9. Üç nokta eğme testi altındaki polimer köpük çekirdekli sandviç kompozitlerde meydana gelen yaygın hatalar.....	9
Şekil 1.10. Düzlem içi basma testi; (a) yük - yer değiştirme grafiği, (b) meydana gelen yapı hataları	10
Şekil 2.1. Geleneksel üretim yöntemi ile eklemeli imalatın karşılaştırılması (a) talaşlı imalat, (b) eklemeli imalat.....	14
Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci	17
Şekil 2.3. ASTM tarafından yapılan eklemeli imalat sınıflandırması	18
Şekil 2.4. Toz yataklı füzyon sisteminin bileşenleri.....	19
Şekil 2.5. Ultrasonik eklemeli imalat süreci; (a) Ultrasonik üretim, (b) CNC ile kesim işlemi	21
Şekil 2.6. Lamine nesne üretimi tekniğine ait sistem yapısı	22
Şekil 2.7. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat yöntemi; (a) bağlayıcı püskürtme süreci, (b) bağlayıcı püskürtme cihazı	23
Şekil 2.8. Sıvı fotopolimer (solda), ışıkla indüklenen polimerizasyon (mor küçük daire monomerleri, turuncu büyük daire oligomerleri, yıldız ise fotobaşlatıcıları sembolize etmektedir.).....	24
Şekil 2.9. Fotopolimerizasyon teknikleri.....	25
Şekil 2.10. Stereolitografi makinesinin komponentleri	26
Şekil 2.11. DLP tekniğini kullanan cihazların komponentleri	26

Şekil 2.12. CDLP/CLIP tekniği	27
Şekil 2.13. Yönlendirilmiş enerji biriktirme tekniği; (a) DED çalışma prensibi ve komponentleri, (b) tel beslemeli sistem, (c) toz beslemeli sistem	28
Şekil 2.14. DED süreçlerinin tel besleme metodolojileri: (a) eş eksenli besleme (WAAM), (b) yanal besleme (WLAM ve WEAM).....	28
Şekil 2.15. Malzeme püskürtme yöntemine ait sistem bileşenleri	30
Şekil 2.16. FDM/FFF üretim tekniğinin şematik gösterimi	32
Şekil 2.17. FDM/FFF teknolojisinde yaşanan önemli gelişmeler	33
Şekil 2.18. FDM/FFF tekniğinde kullanılan filament malzemeler.....	35
Şekil 2.19. FDM/FFF işleme parametrelerinin balık kılçığı diyagramı	36
Şekil 2.20. Baskı kalitesini etkileyen parametreler	38
Şekil 2.21. Farklı numune yönelimleri	38
Şekil 4.1. CATIA V5R21 programında tasarlanan bal peteği yapılar ve geometrik özellikleri	49
Şekil 4.2. Üretim öncesi Cura programından alınan ekran görüntüsü.....	51
Şekil 4.3. Üç boyutlu yazıcının bal peteği yapıları üretim esnasındaki görüntüleri.....	51
Şekil 4.4. Baskı sonrası elde edilen bal peteği yapılar	51
Şekil 4.5. Poliüretan köpük dolgusu süreci; (a) poliöl bileşeninin kütle ölçümü, (b) izosiyanat bileşenlerinin kütle ölçümü, (c) karıştırılan poliöl ve izosiyanatın kalıba dökülmesi, (d) kalıba dökülen karışımın kalıba düzgün formda yayılması, (e) doldurulmak istenen yapının karışımın üzerine oturtulması, (f) poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeği.....	54
Şekil 4.6. Çekirdek yapının istenen forma getirilmesi adına uygulanan zımparalama işlemi	55
Şekil 4.7. Vakum infüzyon ile poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin üretimi	57
Şekil 4.8. El yatırması – vakum torbalama yöntemi ile içi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin üretimi	58
Şekil 4.9. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan numune.....	59
Şekil 4.10. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan numune	60
Şekil 4.11. Kesme testine maruz bırakılan numune	61
Şekil 5.1. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan içi boşluklu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman grafikleri;	

(a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi, (e) B5 numunesi	62
Şekil 5.2. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numunelerinin basma testi için kuvvet - deplasman grafiği.....	63
Şekil 5.3. Test öncesi ve sonrası numuneler; (a) test öncesi numunelerin üstten görünüşü, (b) test öncesi numunelerin yandan görünüşü, (c) test sonrası meydana gelen çekirdek - yüz ayrılması hataları	65
Şekil 5.4. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan içi poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli numunelerin her birinin basma testine ilişkin kuvvet - deplasman grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi, (e) D5 numunesi	66
Şekil 5.5. İçi poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği	67
Şekil 5.6. Test öncesi ve sonrası numuneler; (a) test öncesi numunelerin üstten görünüşü, (b) test öncesi numunelerin yandan görünüşü, (c) test sonrası meydana gelen hatalar	68
Şekil 5.7. Poliüretan köpük dolgulu sandviç yapıda meydana gelen hatalar; (a) yüz - çekirdek arası çatlaklar, (b) yüz burkulması ve çekirdekte yer alan köpük dolgusunda meydana gelen çatlaklar.....	69
Şekil 5.8. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan içi boşluklu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman grafikleri; (a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi, (e) B5 numunesi	70
Şekil 5.9. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği.....	71
Şekil 5.10. Meydana gelen çekirdek ezilmesi, çekirdek kırılması ve çekirdek – yüz ayrılması hataları	73
Şekil 5.11. Meydana gelen çekirdek kırılmaları ve tüm yüzey boyu dikine ilerleyişleri	73
Şekil 5.12. Meydana gelen çekirdek kesme çatlağı ve çekirdek - yüz ayrılması hataları.....	74
Şekil 5.13. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman	

grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi, (e) D5 numunesi	75
Şekil 5.14. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği	75
Şekil 5.15. Üç nokta eğme testi sonrası poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe sahip numunelerde meydana gelen hasarlar	77
Şekil 5.16. Poliüretan dolgulu çekirdek yapıda meydana çekirdek çatlakları, çekirdek kesme hasarları ve yüzey ayrılması hasarları	77
Şekil 5.17. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler için gerilme - gerinim grafikleri; (a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi	79
Şekil 5.18. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin tümü için gerilme - gerinim grafiği	79
Şekil 5.19. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç numuneler için (a) kesme testi öncesi numuneler, (b) kesme testi sonrası numuneler	80
Şekil 5.20. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler için gerilme - gerinim grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi	81
Şekil 5.21. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin tümü için gerilme - gerinim grafiği	82
Şekil 5.22. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç numuneler için (a) kesme testi öncesi numuneler, (b) kesme testi sonrası numuneler	83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	: Sandviç kompozitin genişliği (milimetre, mm)
c	: Çekirdek yapısının kalınlığı (milimetre, mm)
d	: Sandviç kompozitin kalınlığı (milimetre, mm)
$F_s^{n\text{ihai}}$	: Çekirdek kayma dayanımı (Megapaskal, MPa)
G	: Çekirdek kesme modülü (Megapaskal, MPa)
L	: Numune uzunluğu (milimetre, mm)
P	: Numuneye uygulanan kuvvetler (Newton, N)
P_{maks}	: Hasara sebep olan nihai kuvvet (Newton, N)
S	: Alt çenelerin açıklık değeri (milimetre, mm)
t_{fs}	: Tek bir yüzün kalınlığı (milimetre, mm)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
t_{toplam}	: Sandviç kompozitin toplam kalınlığı (milimetre, mm)
u	: Numunede meydana gelen deplasman değerleri (milimetre, mm)
w	: Numuneye ait genişlik (milimetre, mm)
W_m	: Kütle başına enerji absorpsiyonu (kJ/kg)
W_v	: Hacim başına enerji absorpsiyonu (kJ/m ³)
γ	: Kesme gerinimi (mm/mm)
ΔP	: Kuvvet değişimleri (milimetre, mm)
Δu	: Deplasman değişimleri (milimetre, mm)
σ	: Yüz gerilmesi (Megapaskal, MPa)
$\sigma_{n\text{ihai}}$	: Basma yükü altındaki nihai dayanım (Megapaskal, MPa)
$\sigma_{\text{yüz}}$	: Yüzey dayanımı (Megapaskal, MPa)
τ	: Kesme gerilmesi (Megapaskal, MPa)

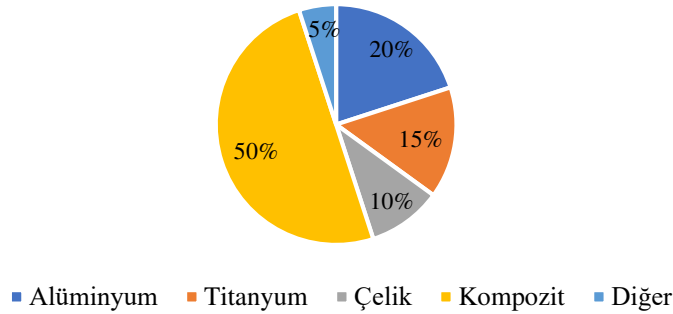
3D/3B	: Three Dimensional/ Üç Boyutlu
3DP	: Three Dimensional Printing
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	: Additive Manufacturing
ASA	: Akrilonitril Stiren Akrilat
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BMI	: Bismaleimid
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAI	: Compression After Impact
CDLP	: Continuous Digital Light Processing
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer
CLIP	: Continuous Liquid Interface Production
CNC	: Computer Numerical Control
DLP	: Digital Light Processing
DMD	: Digital Micromirror Device
EBM	: Electron Beam Melting
EMI	: Electromagnetic Interference
EPP	: Expanded Polypropylene
FDM	: Fused Deposition Modeling
FFF	: Fused Filament Fabrication
FOD	: Foreign Object Damage
HDPE	: High Density Polyethylene
HPS	: High Impact Polystyrene
ISO	: International Organization for Standardization
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LAM-DED	: Laser Additive Manufacturing Directed Energy Deposition
LCD	: Liquid Crystal Display
LED	: Light Emitting Diode
LOM	: Laminated Object Manufacturing
ME	: Material Extrusion
MJT	: Material Jetting
MPVP	: Mask-Projection Vat Photopolymerization
PA	: Poliamid

PBF	: Powder Bed Fusion
PC	: Polikarbonat
PCF	: Peak Compression Force
PCL	: Polikaprolakton
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PHA	: Polihidroksialkanoat
PLA	: Polilaktikasit
PMI	: Polimetakrilimid
PMMA	: Polimetil metakrilat
PS	: Polistiren
PU	: Poliüretan
RepRap	: Replicating Rapid Prototyper
SEA	: Specific Energy Absorption
SHS	: Selective Heat Sintering
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Selective Laser Melting
SLS	: Selective Laser Sintering
STL	: Standard Tessellation Language
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UAM	: Ultrasonic Additive Manufacturing
UV	: Ultraviyole
WAAM	: Wire and Arc Additive Manufacturing
WEAM	: Wire and Electron Beam Additive Manufacturing
WLAM	: Wire and Laser Additive Manufacturing

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, makroskopik seviyede birleştirilen ve birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapısal bir malzemedir [1]. Bileşenlerden biri takviye fazıdır, diğer bileşen ise matris fazıdır. Takviye fazı, matris fazı içine gömülü durumda bulunmaktadır. Takviye fazı malzemesi, lifler, parçacıklar ya da pullar biçiminde olabilmektedir. Matris fazı malzemeleri ise genellikle sürekli dir. Kompozit malzemeler, yüksek performans / kütle oranı sayesinde endüstrilerde giderek artan bir kullanım alanı bulmaktadır [2].

Kütlelerinin hafif olmasından dolayı özellikle havacılık endüstrisinde giderek artan bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu yüksek performans / kütle oranına, karbon, cam veya Kevlar gibi belirli mekanik özelliklere sahip malzemelerin kullanılması neden olmaktadır. Şekil 1.1’de Boeing 787 uçağına ait malzeme türleri ve kullanım alanları verilmiştir. Bu grafikten de anlaşıldığı üzere kompozit malzemeler havacılık endüstrisinde giderek artan bir kullanım alanı bulmakta ve havacılık sanayiinde kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre yüzdece daha çok kullanıldığı görülmektedir [2].



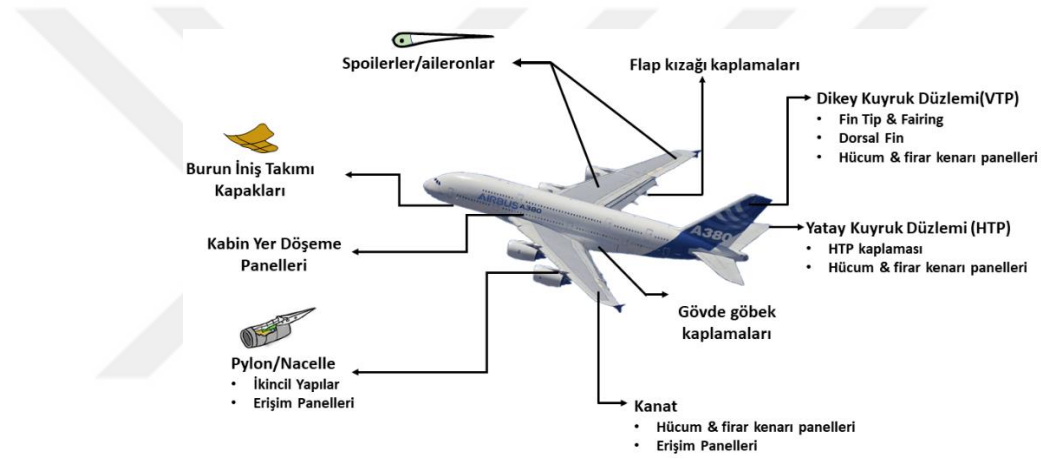
Şekil 1.1. Boeing 787 uçağına ait malzeme kullanım oranları [2]

Hermann vd. (2005) uçak tasarımında mukavemetten ödün vermeden bir yapıyı olabildiğince hafif hale getirecek malzemenin seçilmesinin esas olduğunu belirtmiştir. Ancak bu hafif haldeki yapının çekme ve basma yüklerine ve de bu yüklerin ikili kombinasyonu olan gerilme, burulma ve eğilme yüklerine dayanacak şekilde ince yüzeylerin sağlamlaştırılması ihtiyacına yol açmaktadır [3].

1924 yılında T. von Karman ve P. Stock, gövde yapısı için sandviç yapı kullanarak bir planör uçağı için patent almıştır. Bu durum sandviç yapıların havacılıkta ilk kullanımı olarak kabul edilebilir. 1983 yılında AIRBUS şirketinde büyük yapılar için sandviç kompozit uygulaması, A310 modelinin AIRBUS filosunda bal peteği çekirdekli sandviç

kompozitten yapılmış rudder kumanda yüzeyi ile başlamıştır. Sandviç yapıların geliştirilmesi ve uygulamaları halen ilerlemektedir ve ticari havacılıkta yakın ve orta vadede büyük bir potansiyele sahiptir [3].

Şekil 1.2’de görüldüğü üzere AIRBUS uçaklarında çok çeşitli sandviç kompozit uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamalar; tipik dış yapılarda, aerodinamik kaplamalarda, kapaklarda ve kapılarda görülmektedir. Örneğin, radom bölgesi, göbek kaplamaları, ön ve arka kenar kaplamaları, motor kaputları ve iniş takımı kapılarında sandviç kompozit uygulamaları bulunmaktadır. Ayrıca, AIRBUS filosu içerisinde çeşitli sandviç kompozitten imal edilmiş kontrol yüzeyleri bulunmaktadır (örneğin rudder, aileron, spoiler gibi uçuş kontrol yüzeylerinde) [3].



Şekil 1.2. Airbus A380 uçağında yer alan sandviç kompozit uygulamaları [3]

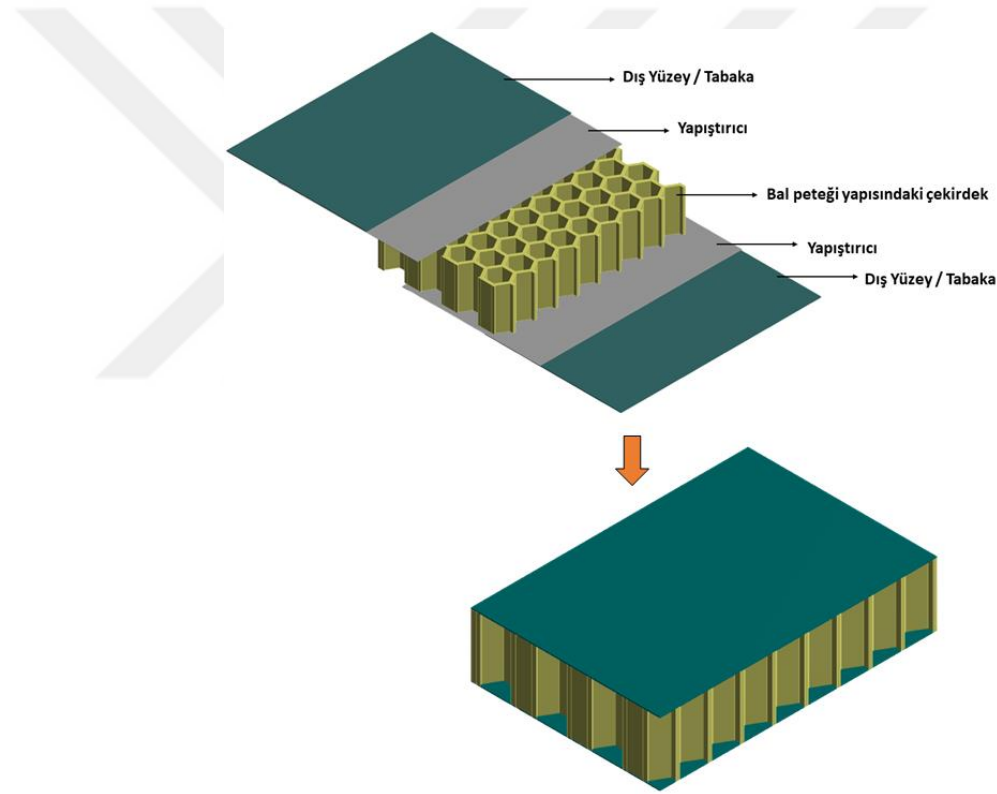
Ticari havacılık uçaklarında sandviç yapılar için gereksinimler çok çeşitlidir. Dış yapılar çok çeşitli çalışma sıcaklıkları ve yüksek aerodinamik yüklerle karşı karşıyadır. Radomlar ve hücum kenarı kaplamaları, kuş çarpması ve dolu, yıldırım çarpması, yağmur ve tozun neden olduğu aşınma nedeniyle darbelere maruz kalır. Ayrıca radar ve aviyonik cihazlar için elektromanyetik dalga iletilebilirliği gereklidir [4].

Pist kalıntılarından kaynaklanan yabancı cisim hasarı (FOD), uçağın alt tarafındaki tüm yüzeyler için karakteristik bir tehdit oluşturmaktadır. Bu örnekler, farklı sandviç kompozit uygulamaları için operasyonel ve çevresel gereksinimlerin çeşitliliğinin altını çizmektedir. Farklı gereksinimleri karşılamak için mevcut sandviç kompozit yapılarında çeşitli malzeme kombinasyonları tercih edilebilir [4].

Toozandehjani vd. (2018) havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan yapısal kompozit türlerinin tabakalı kompozitler ve sandviç kompozit yapıları olduğunu

belirtmiştir. Bir yapısal kompozit sınıfı olarak kabul edilen sandviç paneller, hafif kirişler veya nispeten yüksek sertlik ve mukavemete sahip paneller olarak tasarlanmıştır [4].

Şekil 1.3'te yer alan sandviç kompozit yapısı düşünüldüğünde çekirdek kısma yapıştırılmış iki dış tabaka veya yüzeyden oluşmaktadır, çekirdek kısım dış yüzeylere göre daha kalındır. Dış tabakalar nispeten sert ve güçlü bir malzemeden, tipik olarak alüminyum alaşımlarından, elyaf takviyeli plastiklerden, titanyum, çelik veya kontrplaktan yapılmaktadır. Dış tabakalar yapıya yüksek sertlik ve mukavemet kazandırır ve yüklemekten kaynaklanan gerilme ve basınç gerilmelerine dayanacak kadar kalın olmalıdır. Çekirdek malzeme hafif ve düşük bir esneklik modülüne sahip olmalıdır [5].



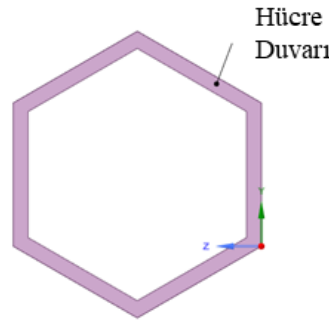
Şekil 1.3. Sandviç kompoziti oluşturan bileşenler

Çekirdek malzemeler; tipik olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. (1)sert polimerik köpükler (yani fenolikler, epoksi, poliüretanlar), (2)ahşap (yani balsa ağacı) ve (3)bal peteği yapılarıdır. Yapısal olarak, çekirdek çeşitli işlevlere hizmet eder. Her şeyden önce, yüzler için sürekli destek sağlamaktadır. Ek olarak, enine kesme gerilmelerine dayanacak yeterli kesme mukavemetine sahip olmalı ve ayrıca yüksek kesme sertliği sağlayacak kadar kalın olmalıdır (panelin bükülmesine karşı koymak için). Çekirdek üzerindeki çekme ve basma gerilmeleri yüzlere göre çok daha düşüktür [5]. Xiong vd. (2019)

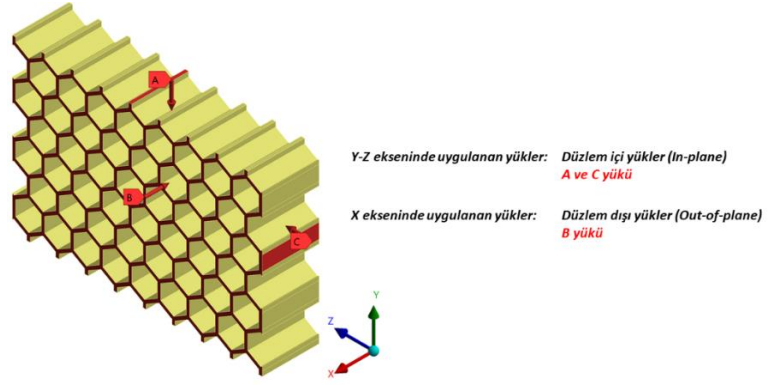
sandviç kompozitlerde çekirdek malzemelerinin hem hafif olması gerektiğini hem de üzerlerine gelen yükleri karşılayabilmesi gerektiğini belirtmiştir. Hafif çekirdeklerin yaygın konfigürasyonları arasında oluklu çekirdek, petekler, katlı çekirdekler (foldcore), köpük çekirdekler ve kafes çekirdekler bulunmaktadır. Bal peteği yapılarda çekirdeğin malzemesi kompozitin kullanılacağı yere göre farklılaşabilmektedir. Örneğin metal veya alaşımdan üretilen çekirdekler enerji emici uygulamalar için Apollo 11 iniş modülünün ayaklarında kullanılmıştır. Daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan bölgelerde ise seramik bazlı malzemelerden üretilen yapılar kullanılmaktadır (örneğin ısı eşanjörleri gibi) [6].

Bal peteği yapılara düzlem içi sıkıştırma (in-plane compression) uygulanırsa ilk aşamada bükülmeye başlar ve lineer elastik deformasyon davranışı gösterir. Kritik gerinim değeri aşıldığında bal peteği yapının hücrelerini oluşturan yapı malzemesine bağlı olarak elastik burkulma, plastik akma, sürünme veya gevrek kırılma ile çöker [7].

Hücrelerin çökmesi zıt hücre duvarları birbirine değmeye başladığında sonlanır; hücreler birbirine yaklaştıkça yapı yoğunlaşır ve sertliği hızla artar. Hücre duvarı malzemesi plastik olarak esnerse, peteğin kendisi geniş bir plastisite gösterir; hücreler gevrek ise kırılır. Düzlem dışı yük altında (out-of-plane compression) hücre duvarları uzamaya veya sıkışmaya maruz kalır, modül değerleri ve çökme gerilimleri çok daha büyüktür. Şekil 1.4'te hücre duvarı kavramı ve Şekil 1.5'te de kuvvetler gösterilmektedir [7].

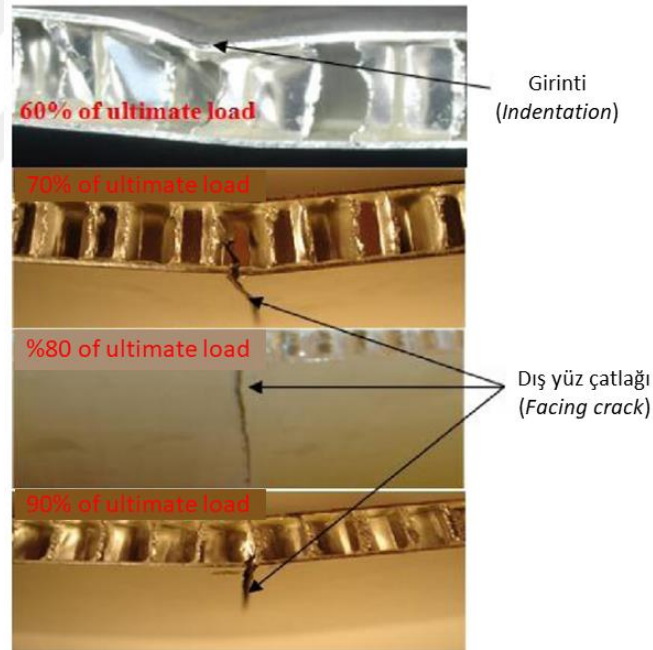


Şekil 1.4. Bal peteği yapı için hücre duvarının gösterimi



Şekil 1.5. Bal peteği yapıya uygulanan kuvvet türlerinin gösterimi

Bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerin üç/dört nokta eğme yükleri altındaki davranışları incelendiğinde ise Şekil 1.6’da görüldüğü üzere yüz malzemesinin çatlaması ve girintilerin oluşması en yaygın iki hata modları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu iki hataya ek olarak Şekil 1.7’de yapışma bölgesinin ayrılması, kayma/kesme hataları, çökme hataları ve bükülme hataları da sıklıkla görülmektedir [8].



Şekil 1.6. Alüminyum ve aramid bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapılarda meydana gelen yaygın hatalar [8]



Şekil 1.7 Bal peteği yapılarda karşılaşılan yaygın hata türleri [8]

Girinti ve çatlayan yüzün çökmesi modlarına ek olarak, aramid çekirdeklerden yapılmış sandviç yapılarda, çekirdeğin kalınlığı boyunca yayılan bir çatlak ile kayma/kesme çatlaklarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip yapılarda ise hücre duvarlarında kayma/kesme burkulması ve çökme modları gözlemlenmektedir. Bunlara ek olarak bazı durumlarda hücre duvarlarında ezilmeler de gözlemlenebilmektedir [8].

Bal peteği yapının avantajlarının yanında yer alan bu dezavantajlarından dolayı son zamanlarda polimerik köpük çekirdekli sandviç kompozit yapılarına dikkat çekilmektedir. Petek çekirdekli sandviç kompozitte bir çatlak başladığında, bu çatlak kolayca açık hücre yapısına potansiyel bir su girişine yol açabilir. Bir uçağın çalışma sırasında maruz kaldığı sıcaklık değişimi göz önüne alındığında, bu suyun boşluklar içinde buharlaşması ve donması sandviç kompozitte yapı için servis süresini azaltan dahili bir hasara dönüşebilir [9].

Ek olarak, çekirdek ve yüzey tabakası arasındaki azaltılmış arayüz alanı, uygulanan bir yük altında iken yüzey ile çekirdeğin ayrılma olasılığını da arttırmaktadır. Petek çekirdekli yapıların bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için, nem Emilimini ve ayrılmayı en aza indirmek için potansiyel bir malzeme olarak polimerik köpüklere dikkat çekilmektedir. Polimerik köpükler, hafiflik, sertlik ve aynı zamanda çok fonksiyonluluğun sağladığı avantajlardan dolayı hem bilimsel hem de endüstriyel topluluklarda artan bir ilgi görmektedir [9, 10].

Polimerik köpük çekirdekleri nem Emilimini ve yüzeydeki tabakaların delaminasyonunu ortadan kaldırmakta ve yoğunluğu çok düşük sandviç yapıların gücünü artırabilmekte, üzerine gelen yüklere ve gerilmelere daha etkili bir şekilde mukavemet

gösterebilmektedir. Polimer köpük çekirdeği, geleneksel peteklere kıyasla hücresel yapısı sayesinde darbe enerjisini daha verimli bir şekilde absorbe etme potansiyeli ile büyük ilgi görmektedir. Evonik Industries raporlarında, polimetakrilimid (PMI) köpüklerin petek yapılarına kıyasla gelişmiş hasar toleransı sağladığını belirtmiştir. Aynı zamanda, araştırmacılar bir sandviç kompozitin eğilme mukavemetinin temelde çekirdeğin performansı tarafından belirlendiğini göstermiştir [11].

Evonik, 2014 yılında Rohacell® Hero polimetakrilimid (PMI) köpük çekirdeğinin tipik bir petek çekirdeği tasarımına göre daha düşük üretim maliyeti, düşük parça ağırlığı ve daha güvenli yapı sağladığını belirtmiştir. Bu köpük temelli sandviç kompozitler, sandviç kompozitler için esnek ve yenilikçi tasarımlar sağlayan yapısal parçalar için AIRBUS tarafından kullanılmıştır [11]. Bunlara ek olarak polimer köpükler, artan yapıştırma alanı, azaltılmış nem emilimi ve kompozit yoluyla daha uygun yük aktarımı dahil olmak üzere peteklere göre üstün özellikleri sayesinde araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Geleneksel petek uygulamalarının aksine, sert polimer köpükler kapalı hücre yapısı içinde yüzeydeki hücreler üzerine minimum reçine aldığından sandviç yapısına gereksiz bir ağırlık katmamaktadır [12].

Polistiren (PS), polimetil metakrilat (PMMA), poliüretan (PU) ve polimetakrilimid (PMI) köpükleri içeren uygulamaya dayalı sandviç kompozitler için çeşitli polimer köpükler tercih edilmektedir. PU köpük, üretim kolaylığı, erişilebilirlik, makul fiyat ve yapısal özellikleri nedeniyle diğer katı hücresel köpüklerden farklıdır. Ayrıca, sert PU köpükler, her bir işlem yöntemi için ayrı ayrı seçilebilen, değişen hücre boyutu ve mekanik performans seçeneklerine sahiptir. Bu durum PU köpükleri mühendislik uygulamaları için cazip hale getirmektedir [10].

Poliüretan, poliöl ve izosiyanatın reaksiyonu ile oluşturulmaktadır. İzosiyanat (sert segment olarak adlandırılır) ve poliöl (yumuşak segment olarak adlandırılır), nihai materyallerin özelliklerini belirleyen tek veya çoklu reaktif gruplar içerebilir. Üretim esnasında izosiyanat ve poliöl arasındaki farklı oranların kullanılması farklı özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Yumuşak segment elastomerik özellikleri korurken, sert segment rijitlik ve tokluk özelliklerini kontrol eder [13].

Ayrıca, nanotakviye (nanofiller) ve katkı maddelerinin ilavesi ve işleme koşulları (sıcaklık, zaman, ekleme yöntemi, vb.) PU köpükleri farklı uygulamalar için uygun hale

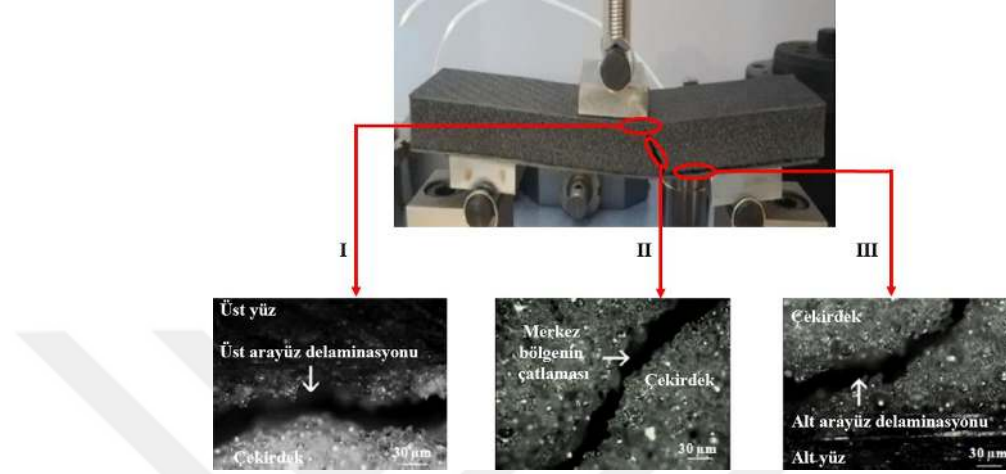
getirmektedir. PU'nın önemli monomerlerinden biri, ticari olarak elde edilebilen polioldür ve ayrıca laboratuvarlarda farklı tekniklerle sentezlenebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan polioller polieter poliöl ve polyester polioldür. PU sentezi sırasında farklı çapraz bağlayıcılar, katkı maddeleri ve nanopartiküller de dahil edilebilir. Uygulama yerine bağlı olacak şekilde, yüzey aktif maddeler, şişirici maddeler ve pigmentler de PU içine karıştırılabilmektedir [13].

Polimer köpükler, mekanik özellikleri uyarlama ve yapılarına çok işlevlilik ekleme avantajına sahiptir. Bu sayede binalarda kullanılan yalıtım malzemelerinden hava araçlarının yapısal bileşenlerine kadar çeşitli uygulamalar için cazip hale gelmektedir. Bu takviye yolları göz önüne alındığında, çekirdek malzeme olarak polimer köpük kullanan sandviç kompozitler, akustik sönümleme, bükülmeye veya darbeye karşı yapısal bir eleman veya elektromanyetik girişim (EMI) kalkanı için bir yapı gibi çeşitli görevleri yerine getirebilmektedir [9].

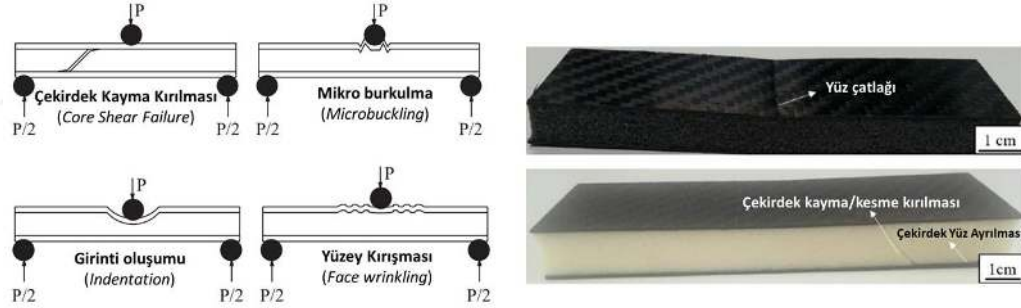
Polimerik köpük çekirdeğe sahip sandviç kompozit yapıları avantajlarının yanında bazı dezavantajlara sahiptirler. Bunlar arasında basma ve eğme yükleri altında meydana gelen çatlağın çok hızlı bir şekilde yayılması ve tüm çekirdek boyuna ulaşması, köpük malzemenin daha hızlı ezilmesi yer almaktadır. Özellikle üç nokta eğme testi yapılan polimer köpük çekirdekli sandviç kompozitlerin hasar mekanizmaları incelendiğinde yüz malzemesinde meydana gelen buruşma, çekirdekte meydana gelen kayma/kesme çatlakları, girinti ve yüzey ile çekirdek malzeme arasındaki yapıştırma bölgesinde meydana gelen ayrılmaların en yaygın hasar türleri olduğu gözlemlenmektedir. Kayma/kesme çatlakları sandviç malzemenin sıkışmaya başladığı yerde başlar ve çekme kuvvetinin meydana geldiği kısımda ise bir bağın ayrılması ile çekirdek boyunca belirli bir açıda ilerleyerek devam eder. Polimer köpüklerde oluşan kayma/kesme çatlakları daha hızlı bir şekilde çekirdek boyunca ilerler ve diğer yüze kadar ulaşır.

Üç nokta eğme testi uygulanan köpük çekirdekli sandviç kompozitlerde genellikle ilk hasar sıkıştırma hacmi bölgesinde, yüz ile çekirdek arayüzünde bir çatlağın oluşması ve yayılması olarak gözlemlenmektedir. Bu çatlak yapının eksenine paraleldir ve bu ilk çatlak test düzeneğinin desteğine kadar yayılır. Bu ilk hasar malzemenin yorulma ömrünün yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Bu hasardan sonra çatlak uygulanan yüke bağlı olarak çekirdeğin kalınlığı boyunca ilerler ve hasarsız yüze kadar ulaşır. Üçüncü ve son adımda ise son yüz ile çekirdek birbirinden ayrılır. Üçüncü adımda meydana gelen

hasar hızlı bir olaydır ve yorulma ömrünün %7-8'ini kaplar. Genel olarak bu üç hasar mekanizması incelendiğinde çekirdekte meydana gelen kayma/kesme kırılmasının çok hızlı bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir [14]. Şekil 1.8'de bu hasar mekanizması ve Şekil 1.9'da ise meydana gelen yaygın hatalar gösterilmektedir.

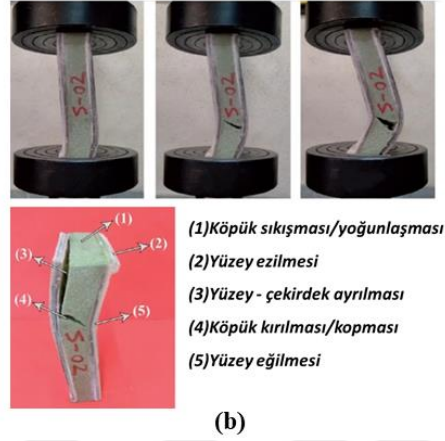
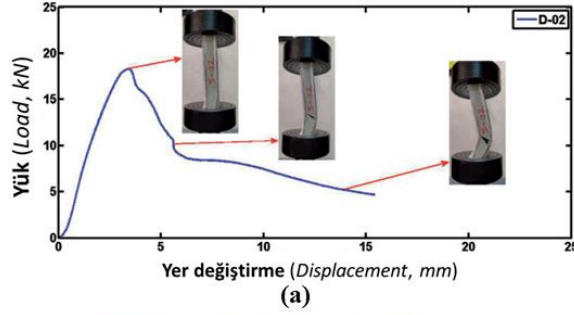


Şekil 1.8. Üç nokta eğme testi altında meydana gelen hasarlar; (I) çekirdek - üst yüz delaminasyonu, (II) çekirdek boyuncu çatlağın ilerlemesi, (III) çekirdek - alt yüz delaminasyonu [9,14]



Şekil 1.9. Üç nokta eğme testi altındaki polimer köpük çekirdekli sandviç kompozitlerde meydana gelen yaygın hatalar [9,15]

Düzlem içi basma testine tabii tutulan köpük çekirdekli sandviç yapıda basma yükü uygulanmaya başladıktan sonra, uygulanan yük numunenin burkulma yükü olan bir tepe noktasına kadar doğrusal olarak artar. Bu tepe yükünden sonra bükülmeler ve bu bükülmelerle beraber çekirdek – yüz ayrılması gerçekleşmektedir. Yük uygulanmaya devam edildikçe çatlak oluşumu gerçekleşmekte ve bu çatlak çok hızlı bir şekilde çekirdeğin kalınlığı boyunca ilerleyip diğer yüzze kadar ulaşmaktadır. Sıkıştırma yükü uygulanmaya devam edildiğinde bükülme iyice artarak diğer yüzde de çekirdek - yüz ayrılması meydana gelecektir. Şekil 1.10'da yük – yer değiştirme (deplasman) grafiği ve meydana gelen yaygın hatalar gösterilmektedir [16].



Şekil 1.10. Düzlem içi basma testi; (a) yük - yer değiştirme grafiği, (b) meydana gelen yapı hataları [16]

1.1. Araştırma Problemi

Hava aracı yapılarında kullanılan sandviç kompozitler genellikle yüz malzemesi olarak alüminyum ve çekirdek malzemesi olarak tasarıma göre değişmekle birlikte Nomex petek ya da alüminyum petek yapılar kullanılmaktadır. Son yıllarda araştırmacılar ve endüstriler polimerik köpük çekirdeklere de yönelmiştir ve çekirdek malzemesi olarak kullanmaya başlamışlardır. Bal peteği yapısı hem yüksek basma mukavemeti hem de hafifliği açısından caziptir. Bununla birlikte, bal peteği yapıların uçakların yapısal bileşeni olarak kullanıldığında bazı dezavantajları bulunmaktadır [9,10].

Bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitte bir çatlak başladığında, bu çatlak kolayca açık hücre yapısına potansiyel bir su girişine yol açabilir. Bir uçağın çalışma sırasında maruz kaldığı sıcaklık değişimleri göz önüne alındığında, bu suyun boşluklar içinde buharlaşması ve donması sandviç kompozitte yapının ömrünü azaltabilecek dahili bir hasara dönüşebilir. Ek olarak, çekirdek ve yüzey tabakası arasındaki azaltılmış arayüz alanı, uygulanan bir yük altında iken yüzey ile çekirdeğin ayrılma olasılığını da artırmaktadır. Bal peteği çekirdeğe sahip yapıların bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için, nem emilimini ve tabaka ayrılmasını en aza indirmek adına potansiyel bir malzeme olarak polimerik köpük malzemelere dikkat çekilmektedir [9,10].

Bunlara ek olarak daha önce belirtildiği üzere altıgen yapı içi boşluklu bir yapıda olduğu için yük altında hızlı eğilmeler ve kırılmalar meydana gelebilmektedir. Köpük yapıda ise oluşan çatlaklar çok hızlı şekilde tüm yapıyı kaplayabilmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Hedefi

Giriş bölümünde bahsedilen bal peteği çekirdekli yapılarda ve polimer köpük çekirdekli yapıların mekanik dayanımını artırmak amacıyla bu iki yapıyı ayrı malzemeler olarak kullanmak yerine birlikte kullanarak basma, eğme ve kesme yükleri altındaki yapının mukavemetini artırmak, çatlak oluşumunu ve ilerleyişini yavaşlatmak hedeflenmektedir.

Bu amaçla içi boşluklu bal peteği çekirdek yapı poliüretan köpük ile doldurulacaktır. Poliüretan köpük dolgusunun bal peteği çekirdekli yapıların hücre duvarlarının inceliğinden kaynaklanan çekirdek ile yüz malzemesinin yapıştırma alanının kısıtlı olması problemini ortadan kaldırması ve yapıştırma alanı ile birlikte kesme, basma ve eğme yükleri altında çekirdek – yüz mukavemetini artırması hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında önerilen malzemenin düzlem içi basma yükleri altında hem bal peteği yapıların hem de poliüretan köpük yapıların çökme ve ezilme dayanımını artırması hedeflenmektedir. Benzer şekilde poliüretan köpük dolgusunun eğme yükleri altında her iki çekirdek türünde meydana gelen çekirdek – yüz ayrılması hasarları ve çekirdek kesme çatlaklarının oluşumunu geciktirmek ve çekirdeğin eğme mukavemetini artırması hedeflenmektedir. Ayrıca poliüretan köpük dolgusunun sandviç kompozitin nem emilimini azaltması hedeflenmektedir. Üretimi gerçekleştirilecek olan bal peteği yapı FDM tekniği ile üretilmektedir. FDM tekniği kullanılarak daha kolay erişilebilir ve daha hızlı bir üretim gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

1.3. Çalışmanın Yöntemi

Çalışma kapsamında FDM tekniği ile üretilen bal peteği çekirdek yapıları belirtilen amaçlar doğrultusunda poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Vakum infüzyon yöntemi ile karbonfiber yüz malzemeleri epoksi reçine ile birleştirilmiştir ve sandviç kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada önerilen sandviç kompozit düzlem içi basma (edgewise compression) , üç nokta eğme, kesme (shear) mekanik testlerine ek olarak su emilim testlerine tabii tutulmuştur.

Önerilen malzemenin mekanik dayanımını ortaya çıkarmak adına aynı teknik ve malzemelerle üretilen içi boşluklu bal peteği yapı yine aynı karbonfiber malzemesi ve aynı epoksi sistemi ile sandviç kompozit formuna getirilmiştir. Her iki malzeme için elde edilen mekanik dayanım değerleri ve su emilim testi kapsamındaki ağırlık artışı değerleri kıyaslanmıştır.



2. EKLEMELİ İMALAT

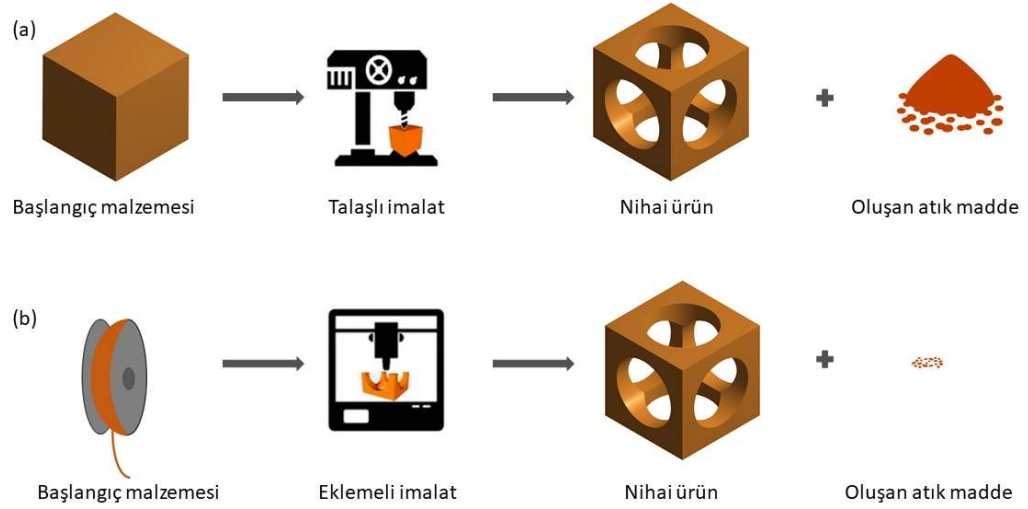
Eklemeli imalat, önceleri hızlı prototipleme (rapid prototyping) olarak bilinen ve yaygın olarak üç boyutlu baskı (3D printing) olarak kullanılan kavramların resmileştirilmiş halidir. Hızlı prototipleme kavramı, nihai ürün oluşturulmadan önce hızlı bir şekilde bir sistem veya sistem parçaları oluşturmak için kullanılan yöntemleri ve süreci tanımlayan bir kavramdır. Önceleri hızlı prototipleme kavramı kullanılsa da “prototipleme” terimi bu teknolojinin bugünkü kullanım alanları düşünüldüğünde eksik ve yetersiz kalmaktadır [17].

Günümüzde pek çok parça aslında doğrudan bu makinelerde üretildiğinden bunları prototip olarak adlandırmak yanlış olmaktadır. Ayrıca hızlı prototipleme terimi bu teknolojilerin temel çalışma prensibini de gözden kaçırmaktadır, çünkü bu teknolojileri kullanarak üretim yapan cihazların tümü eklemeli bir yaklaşım kullanarak parça üretmektedir. ASTM International bu hususta yeni bir terminoloji benimsenmesi için hızlı prototipleme yerine eklemeli/katmanlı imalat kavramının kullanılmasına karar vermiştir [17].

Eklemeli imalat olarak adlandırılan bu teknolojinin temel prensibi, bilgisayar destekli tasarım (CAD – computer aided design) programları kullanarak oluşturulan üç boyutlu tasarımların süreç planlamasına gerek kalmadan doğrudan üretilebilmesine imkan tanımaktadır. Eklemeli imalat her bir katman CAD verilerinden türetilen parçanın ince bir kesitidir. Her bir katman ne kadar ince olursa, son kısım orijinaline o kadar yakın olacaktır. Bugün kullanılan tüm eklemeli imalat cihazları, katman tabanlı bir yaklaşımı benimsemektedir. Üretimlerin farklılık göstermesinin sebebi ise kullanılan malzemeler, katmanların nasıl oluşturulduğu ve katmanların birbirine nasıl bağlandığıdır. Bu gibi farklılıklar, nihai parçanın doğruluğunu, malzeme özelliklerini ve mekanik özelliklerini belirleyecektir. Ayrıca parçanın ne kadar hızlı üretilebileceği, ne kadarlık bir son işleme gerektirdiğini, kullanılacak makinenin boyutunu ve makine ile üretim işleminin toplam maliyeti gibi faktörleri de belirleyecektir [17].

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere daha büyük bir stoktan veya sac metalden malzemeleri çıkararak ürünler üreten işleme ve damgalama gibi geleneksel üretim tekniklerinin aksine, eklemeli imalat malzeme ekleyerek son şekli oluşturduğu için oldukça yüksek geometrik doğruluğa ulaşırken hammaddeleri verimli kullanma ve minimum atık üretme yeteneğine sahiptir. Katmanlı imalat kullanılarak, bilgisayar

ortamındaki 3B katı model formundaki bir tasarım, ek fikstürler ve kesici aletler kullanılmadan doğrudan bitmiş bir ürüne dönüştürülebilmektedir [18].



Şekil 2.1. Geleneksel üretim yöntemi ile eklemeli imalatın karşılaştırılması (a) talaşlı imalat, (b) eklemeli imalat [19]

Eklemeli imalat teknolojileri geleneksel üretim süreçlerine kıyasla oldukça önemli avantajlara sahiptir, bu avantajların etkisiyle yenilikçi ve ileri eklemeli imalat teknolojileri hızla geliştirilmektedir. Geleneksel üretim yöntemleri esas olarak eksiltici/çıkartmalı prosedürlere dayandığından, bu süreçler üretilen parçaların karmaşıklık seviyesini sınırlamaktadır. Eklemeli imalat, bir parçanın katman katman üretimine dayanan ve geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilebilecek olandan çok daha karmaşık tasarımlı parçaların üretilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Eklemeli imalatın geleneksel üretim tekniklerine göre avantajları şu şekildedir [20 – 22] ;

- Eklemeli imalat teknikleri ile geniş bir malzeme yelpazesi (polimerler, metaller, seramikler vb.) aynı prosedürlerle herhangi bir ek harici parametre ve ekipman gerektirmeden işlenebilmektedir.

- Eklemeli imalat teknikleri enjeksiyon kalıplama gibi yaygın olarak kullanılan birçok imalat tekniğinin aksine, yüksek maliyet nedeniyle üretime engel olabilecek hiçbir alet gerektirmemektedir.

- Eklemeli imalat teknikleri tasarımda esneklik sağlamaktadır. Üretim sırasında bile tasarımı hızlıca değiştirebilmek mümkündür. Son derece hafif ve kararlı olabilen oldukça karmaşık yapıların üretimine imkan tanımaktadır. Yüksek tasarım esnekliği seri üretimde bile ürün özelleştirmeleri sağlamaktadır.

- Geleneksel imalat teknikleri daha fazla geometrik sınırlamaya sahiptir dolayısıyla üretimleri de uzun zamanlar almaktadır. Buna karşın eklemeli imalat teknikleri modelleri saatler içerisinde hızlı bir şekilde üretebilmektedir.

- Eklemeli imalat teknikleri üretim yeri konusundaki kısıtlamaları da ortadan kaldırmaktadır. Parçalar dijital olarak gönderilebilir ve uygun cihaza sahip herhangi bir yerde basılabilir. Bu da taşıma gereksinimini ve bağımlılığı azaltmaktadır.

- Eklemeli imalat geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla hiç atık üretmeden üretim sürecini tamamlar. Bundan dolayı eklemeli imalat süreci çevreci ve temiz bir süreç olarak kabul görmektedir.

Bu teknoloji, 1986 yılında Charles Hull tarafından stereolitografi (SLA) olarak bilinen bir süreçte geliştirilmiştir ve bu adımı tekne fotopolimerizasyonu, bağlayıcı püskürtme, toz yatak füzyonu (powder bed fusion) ve ergiyik biriktirme modellemesi (fused deposition modeling – FDM) gibi sonraki gelişmeler takip etmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Malzeme Üretimi

Bütün eklemeli imalat teknikleri, eşit kalınlıktaki katmanların üst üste birleştirilmesiyle üretim faaliyetini gerçekleştirmektedir. Katmanlar, iki boyutlu olarak x-y düzleminde biçimlendirilmekte ve bu katman dilimleri z ekseninde üst üste biriktirilerek malzemeyi oluşturmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere z eksenindeki adımlar ne kadar küçük olursa model o kadar üretilmesi planlanana yakın olarak üretilcektir. Eklemeli imalat tekniklerinde fiziksel modeller doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerinden üretilmektedir. Elde edilmek istenen modelin CAD verileri ise bilgisayar üzerinde sanal tasarım ile elde edilebilirken üretilmiş bir nesnenin tersine mühendislik ya da 3B tarama gibi yöntemlerle de elde edilebilmektedir. CAD verileri elde edildikten sonra ikinci adım CAD verilerinin STL dosyasına dönüştürülmesidir [17,20,22].

STL dosyası 1987 yılında 3D Systems şirketi tarafından eklemeli imalat tekniklerinden biri olan stereolitografi ilk geliştirildiğinde oluşturulmuştur ve STL dosyası bu tekniği ifade etmek için kullanılmıştır. Ayrıca STL Standart Mozaik Dili (STL – Standard Tessellation Language) olarak da adlandırılmaktadır. Başka dosya türleri de bulunmaktadır, ancak STL dosyası her eklemeli imalat süreci için standarttır ve 3D yazıcılar kullanılarak oluşturmak istenen modelin dijital ayak izidir. STL dosyası, baskı

için gerekli olan 3D modelleme işlemine ait tüm bilgileri içermektedir. STL dönüşümünden sonraki adımda STL dosyası bir dilimleme programında ince tabakalara ayrılır [23,24].

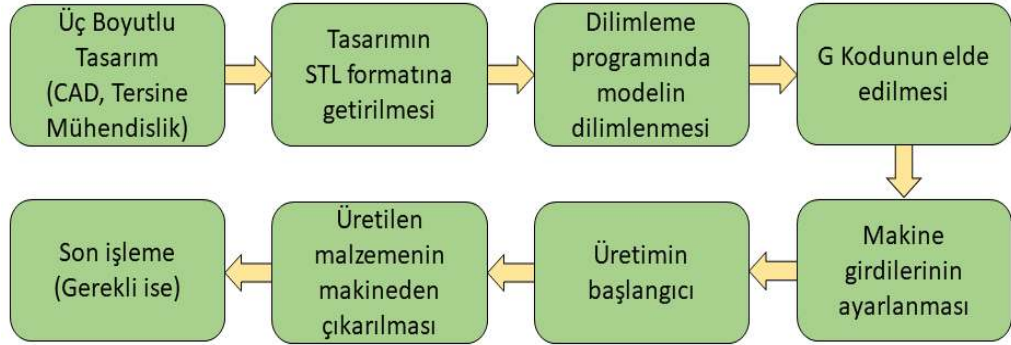
Matematiksel yöntemlerle eşit katman kalınlıklarının oluşturulmasına dilimleme adı verilmektedir. Dilimleyici programı daha sonra üretim için talimatlar oluşturacaktır yani yazıcının nesneler oluşturmak için hareket etmesi gereken yol planlamasını gerçekleştirmektedir. Model dilimleyicide açıldığında, dönüşü kontrol edebilir, boyutu ve diğer girdileri değiştirilebilir, nesnenin içeriden nasıl doldurulacağına ilişkin diğer ayrıntılar (yönelim, tarama açısı vb.) gibi parametreler ayarlanabilir. Tüm bunların yapılabilmesi için STL formatındaki dosya dilimleyici programında G koduna dönüştürülür [23,24].

G kodu, insanların bir makineye bir şeyi nasıl yapacağını tanımlamak için kullandığı bir dildir. G kodu 1950'lerin sonundan beri hayatımızda olan ve en yaygın olarak kullanılan CNC (Computer Numerical Control) programlama dilidir. G Kodları, cihaza tam olarak hangi eylemleri gerçekleştireceğini – nozul kısmının ne tarafa gitmesi gerektiğini, hangi hızın kullanılacağını, hangi sıcaklıkların (ekstrüder ve tabla sıcaklıkları gibi) ayarlanacağını, tarama açısını, doluluk oranını ve çok daha fazlasını söylemektedir. Bu verilere göre motorlar hareket ettirilerek baskı işlemi gerçekleştirilmektedir [25-27].

G kodları oluşturulduktan sonraki adım ise üretim sürecinin başlatılmasıdır. Üretim tipine göre gerekli hammadde cihaza yüklenir ardından modelin dilimleme programında elde edilen formatı da cihaza aktarılır ve üretim başlatılır. Üretimi yapılacak malzemenin boyutuna, üretim yapılan makineye ve kullanılan malzemelere göre üretimin tamamlanması saatler ya da günlerce sürebilir. Pek çok cihaz hata durumunda üretimi durdursa da üretim esnasında hata meydana gelmediğinden emin olmak için periyodik aralıklarla üretim kontrol edilmesi faydalı olacaktır. Üretim tamamlandıktan sonraki adım ise üretilen nesne/nesnelerin makineden çıkarılmasıdır [28-32].

Eklemeli imalat ile üretim adımlarının en sonuncusu ise üretim tekniğine göre bazı tekniklerde gerekli olan üretim sonrası son işleme adımındır. Bazı teknikler üretim sonrası son işleme adımları gerektirmektedir. Bazı malzemelerin sertleşmesi için zaman gerektiğinden dolayı yeni üretilmiş parça bu adımda zayıf olabilir, bu nedenle

kırılmamasını veya dağılmamasını sağlamak için dikkatli olunması gerekebilir. Eklemeli imalat ile üretim sürecini özetleyen diyagram Şekil 2.2’de gösterilmektedir [33].

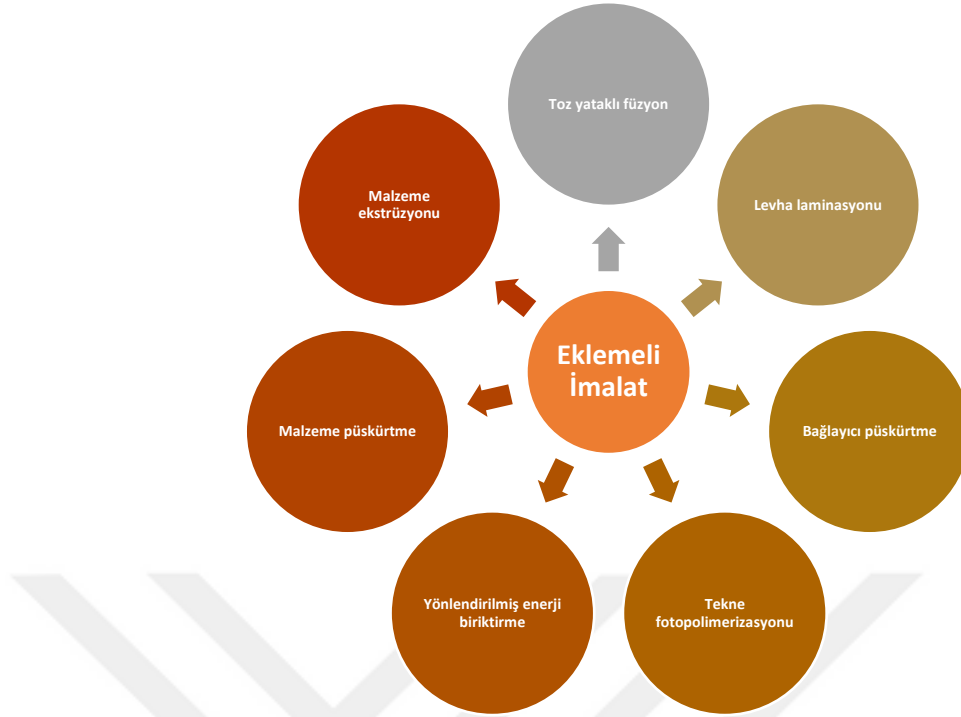


Şekil 2.2. Eklemeli imalat süreci [33]

2.2. Eklemeli İmalat Tekniklerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat teknikleri çok yönlü geometrik yetenekleri, minimum insan etkileşimi, geniş malzeme yelpazesi gibi oldukça önemli avantajlara sahip olduğundan zaman içerisinde pek çok farklı teknik geliştirilmiştir. Tekniklerdeki bu çeşitlilik sayesinde eklemeli imalat pek çok uygulama alanı bulmuş uçak motoru, uçak gövdesi, uzay bileşenleri ve otomobil bileşenleri gibi alanlarda karmaşık geometrilere sahip fonksiyonel parçalar üretimini sağlamıştır. ASTM eklemeli imalat kavramını standardize etmiştir ve 2009 yılında oluşturulan ASTM F42 komitesi eklemeli imalat tekniklerini yedi kategoride sınıflandırmıştır [34]

Bu sınıflandırma toz yataklı füzyon sistemleri (powder bed fusion), levha laminasyonu (sheet lamination), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), tekne fotopolimerizasyonu (vat photopolymerisation), yönlendirilmiş enerji biriktirme (direct energy deposition), malzeme püskürtme (material jetting) ve malzeme ekstrüzyonu (material extrusion) şeklindedir. Eklemeli imalat sınıflandırması Şekil 2.3’te yer alan diyagramda gösterilmektedir [35].



Şekil 2.3. ASTM tarafından yapılan eklemeli imalat sınıflandırması [35]

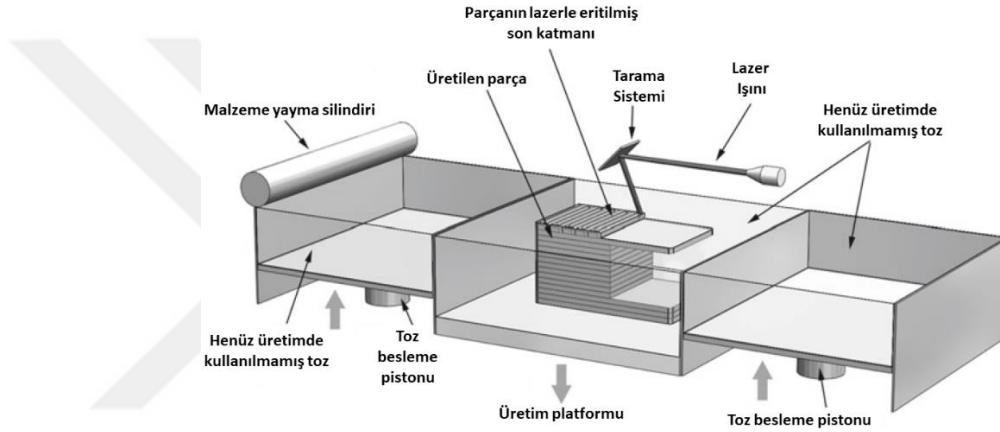
2.2.1. Toz yataklı füzyon sistemleri

Toz yatağı füzyon sisteminde enerji kaynağı olarak lazer ya da elektron ışınının ısı enerjisi (odaklanmış termal enerji) kullanılarak hammadde olan toz yatağı içerisindeki bölgeler eritilmekte ve modelin üç boyutlu hali katmanlar şeklinde oluşturulmaktadır. Tasarıma göre ilk katman eritildikten sonra sıradaki katman için toz katmanları ilave edilir ve modele göre ilgili bölgeler eritilerek bir sonraki katman oluşturulur, son katman tamamlanıp parça oluşturulana kadar işlem aynı sırada gerçekleştirilir. Toz yatağının altında bulunan bir hazne veya rezervuar taze malzeme teminini sağlar. Fazla malzemeyi çıkarmak ve yüzeyleri pürüzsüz hale getirmek için son işlem uygulamaları gerektirir. Toz yataklı sistemlerde özel destek yapılarına ihtiyaç duyulmamaktadır, çünkü her katmanda yer alan fazla toz, üretilen parça için destek görevi görmektedir. Şekil 2.4'te toz yataklı füzyon sisteminin bileşenleri gösterilmektedir [20].

Yüksek çözünürlük ve yüksek baskı kalitesi, toz yatağı füzyonunun ana avantajlarıdır ve bu da onu karmaşık yapıların basılması için uygun hale getirmektedir. Toz yatağı füzyon teknikleri, doku mühendisliği, kafes yapılar, havacılık ve elektronik gibi gelişmiş uygulamalar için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemin ana avantajı, destek malzemesinin çıkarılmasındaki zorlukların üstesinden gelen destek olarak toz yatağının kullanılmasıdır. Üretim sürecinin yavaş bir süreç olması ve yüksek üretim maliyetleri bu tekniklerin ana dezavantajlarıdır [36, 37].

Üretimi gerçekleştirmek için çeşitli termal enerji kaynaklarını kullandıklarından dolayı toz yatağı füzyonu çeşitli varyasyonlara sahiptir. Bu varyasyonlar seçici lazer sinterleme (SLS – selective laser sintering), seçici lazer eritme (SLM – selective laser melting), seçici ısı sinterleme (SHS – selective heat sintering) ve elektron ışını ile eritmedir (EBM – electron beam melting). Tüm toz yatağı füzyon (PBF) işlemleri, toz malzemenin önceki katmanlar üzerine yayılmasını içermektedir [20].



Şekil 2.4. Toz yataklı füzyon sisteminin bileşenleri [38]

2.2.1.1. Seçici lazer sinterleme (SLS)

SLS'de kontrollü bir yola sahip bir lazer ışını, tozları ısıtarak sinterlemek için taramaktadır. Yüksek güçlü lazerler altında, komşu tozlar moleküler difüzyon yoluyla birbirine kaynaştırılır ve ardından bir sonraki katmanın işlenmesi başlar. Nihai ürünleri elde etmek için bağlanmamış toz çıkarılmalıdır. Parçanın çözünürlüğü, toz partikül boyutu, lazer gücü, tarama aralığı ve tarama hızı ile belirlenir. Teorik olarak toz formundaki herhangi bir termoplastik polimer SLS tekniği ile işlenebilmesine rağmen, sinterleme sırasındaki karmaşık konsolidasyon davranışı ve moleküler difüzyon işlemi, SLS işleminde kullanılan malzeme seçimini sınırlamıştır. Bugüne kadar polikaprolakton (PCL) ve poliamid(PA) yaygın olarak kullanılan lazer sinterleme malzemeleridir [29,39].

2.2.1.2. Seçici lazer eritme (SLM)

SLM, toz yatağı füzyon teknolojileri altında sınıflandırılan 3B nesneler üretmek için metal tozu yatağına bir lazer ışınının çarptırıldığı bir süreçtir. SLS'ye benzer şekilde,

tekrarlanan lazer işleme ve toz yayma işlemi, nesneyi katman katman istenen geometride oluşturmaktadır. Ancak SLM'de SLS'den farklı olarak nispeten daha yüksek güçlü bir lazer, tozu sinterlemek yerine her bir metal tozu katmanını tamamen eritmektedir. SLS'de kullanılan malzeme metallerin yanı sıra çeşitli polimerler içerirken, SLM sadece paslanmaz çelik, titanyum, kobalt-krom ve alüminyum parçalar gibi belirli metallerle kullanılabilir. SLM'de lazer taramasından sonra tozlar tamamen eritilip kaynaştırıldığından bu durum üstün mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilmesini sağlamaktadır [40,41].

2.2.1.3. Elektron ışını ile eritme (EBM)

EBM tekniği SLM sürecine çok benzemektedir, ancak karşılaştırıldığında aralarında bazı farklılıklar bulunmaktadır. EBM süreci, toz parçacıklarının eritilmesi ve füzyonu için lazer ışını yerine bir elektron ışını kullanmaktadır. Toz yatağı yüksek sıcaklıklarda (>870 K) tutulur ve üretimin tamamlanmasından sonra toz yatağını soğutmak için gece boyunca soğutma süreleri gerekmektedir. EBM süreci, yüksek vakumlu bir atmosferde çalışır. Üretim işlemi parametrelerinin optimizasyonu SLM prosesinden çok daha zordur ve bu nedenle EBM'de sadece sınırlı malzemeler kullanılmaktadır (Ti6Al4V, Inconel 718, CoCrMo) [41,42].

2.2.1.4. Seçici ısı sinterleme (SHS)

SHS, SLS'ye çok benzemektedir, ancak sinterleme için lazer yerine termal baskı kafası kullanır, bu da bu işlemi daha ucuz hale getirmektedir. SHS ile üretimde, toz halindeki malzeme erime noktasının hemen altına kadar ısıtılır ve daha sonra bir silindir kullanılarak üretim platformu üzerinde düz bir tabaka halinde yayılır. Bir termal baskı kafası platform boyunca hareket eder ve CAD modelinin bir kesitini toz içinde eritir, bu da toz parçacıklarının sinterleme yoluyla birbirine yapışması sağlanır [43,44].

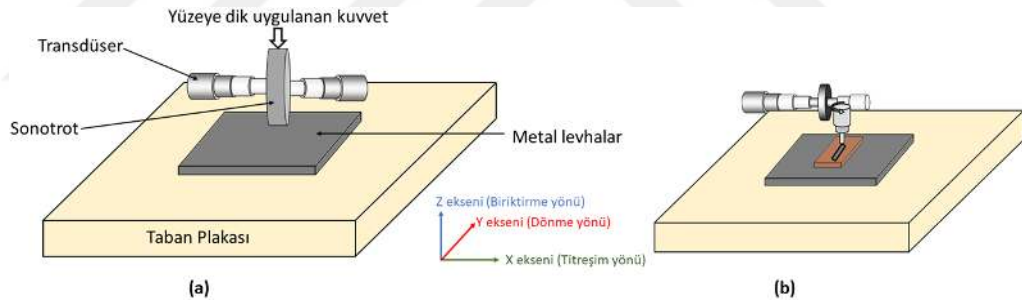
2.2.2. Levha laminasyonu

Levha laminasyonu, levhaların art arda serilmesini, yapıştırılmasını ve malzeme tabakası katmanlarını CAD verilerine göre lazer ile keserek farklı geometrik şekil ve boyutta parçalar üretilmesini sağlayan eklemeli imalat sürecidir. Katmanların üretim platformuna serilmesi işlemi bir silindir vasıtasıyla gerçekleştirilir. Levhaları birbirine bağlamak için yapıştırma, termal yapıştırma ve ultrasonik kaynak gibi farklı mekanizmalar kullanılmaktadır. Lamine Nesne İmalatı (LOM) ve Ultrasonik Eklemeli İmalat (UAM), levha laminasyonunun iki ana tekniğidir [45,46].

2.2.2.1. Ultrasonik eklemeli imalat

Ultrasonik eklemeli imalat, metal sac levhaların art arda üç boyutlu şekle ultrasonik olarak kaynaklanması yoluyla katı metal nesneler oluşturmayı içeren bir metal eklemeli imalat veya 3B baskı işlemidir. Oda sıcaklığında sac levha yığınlarına ultrasonik dalga ve mekanik basınç uygulanarak, yığın levhaların ara yüzleri erime yerine difüzyonla bağlanır. Metalik levhalar bir taban plakası üzerine serilir ve istiflenir. Dijital olarak kontrol edilen bir sonotrot, ultrasonik titreşim ve basınç sağlamak için yuvarlanma yönü boyunca hareket eder [47].

Sonotrotun yüksek frekanslı titreşimi kullanılarak daha önce birleştirilen yapılara yeni bir metal levha yapıştırılır. Yapıştırmadan önce metal levhalar genellikle tasarlanan geometriye göre kesilir. İki veya daha fazla levha birleştirilirken ara yüzlerdeki sürtünme ısısı sebebiyle birleştirilmiş bölgenin sıcaklığı artacağından bir sonraki katmanın üretimine geçmeden kısa bir süre soğuması için beklenmektedir. Bu yöntem birleştirilmemiş metal malzemenin CNC ile çıkarılması ek işlemini gerektirmektedir. Şekil 2.5'te Ultrasonik eklemeli imalat yöntemi gösterilmektedir [47].



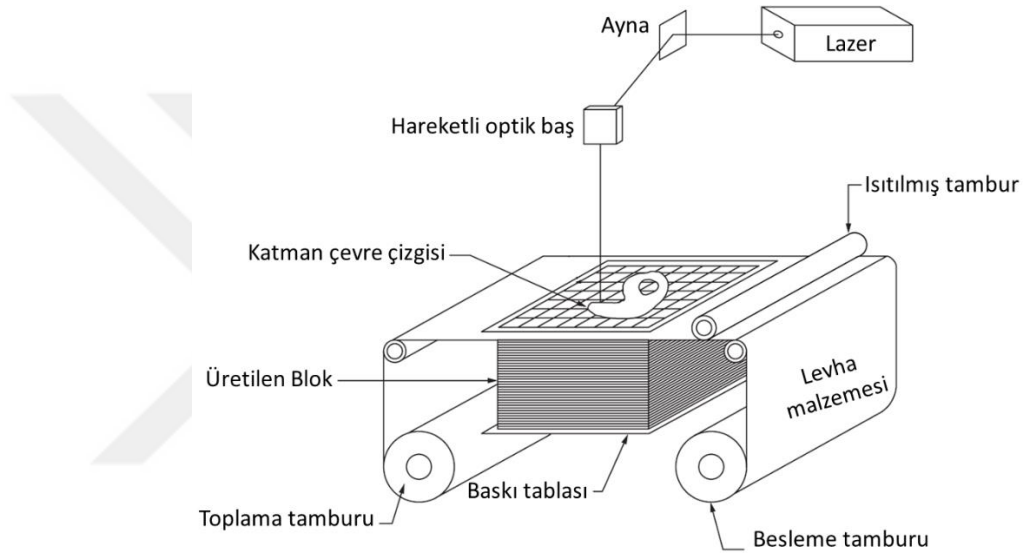
Şekil 2.5. Ultrasonik eklemeli imalat süreci; (a) Ultrasonik üretim, (b) CNC ile kesim işlemi [47]

2.2.2.2. Lamine nesne üretimi

Lamine nesne üretimi tekniğinde bir plastik malzeme ısı ve basınç kullanılarak katmanlar halinde lamine edilir ve daha sonrasında bir lazer kaynağı ile CAD verilerine göre kesilerek istenen şekle getirilir. Baskı tabanına besleme tamburundan bir plastik levha yayılır. Bir lazer x ve y ekseninde hareket eder ve plastiği çizime göre keser. İlk olarak lazer levhadan dikdörtgen bir alan keser ve ardından katman üzerindeki çizim desenini keser. Ardından, desenin dışındaki herhangi bir alan çapraz taranır. Bu çapraz tarama, baskı işleminin sonunda fazlalık malzemelerin kolayca çıkarılmasını sağlamaktadır. Her kesme katmanından sonra, besleme tamburundan yeni bir plastik levha bir önceki katmanın üzerine beslenmektedir. Basılan katmanın tortusu, bir tortu

tamburunda toplanır. Isıtılmış bir sıcak düzleştirici tambur, ısı aktivasyonu ile önceki katmana yapışması için yeni plastik katman üzerinde yuvarlanır [48,49].

Lamine nesne üretimi yaygın olarak kullanılan eklemli imalat yöntemlerinden birisidir. Kullanılmayan tabaka baskı için yapısal bir destek görevi gördüğünden baskı için herhangi bir yapısal destek gerektirmemektedir. Levhaların katman kalınlığı, yüzey kalitesi ve üretilen parçaların genel kalitesi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemle karmaşık parçaların üretimi pek mümkün değildir. Şekil 2.6’da lamine nesne üretimi tekniğine ait sistem yapısı gösterilmektedir [50].



Şekil 2.6. Lamine nesne üretimi tekniğine ait sistem yapısı [50]

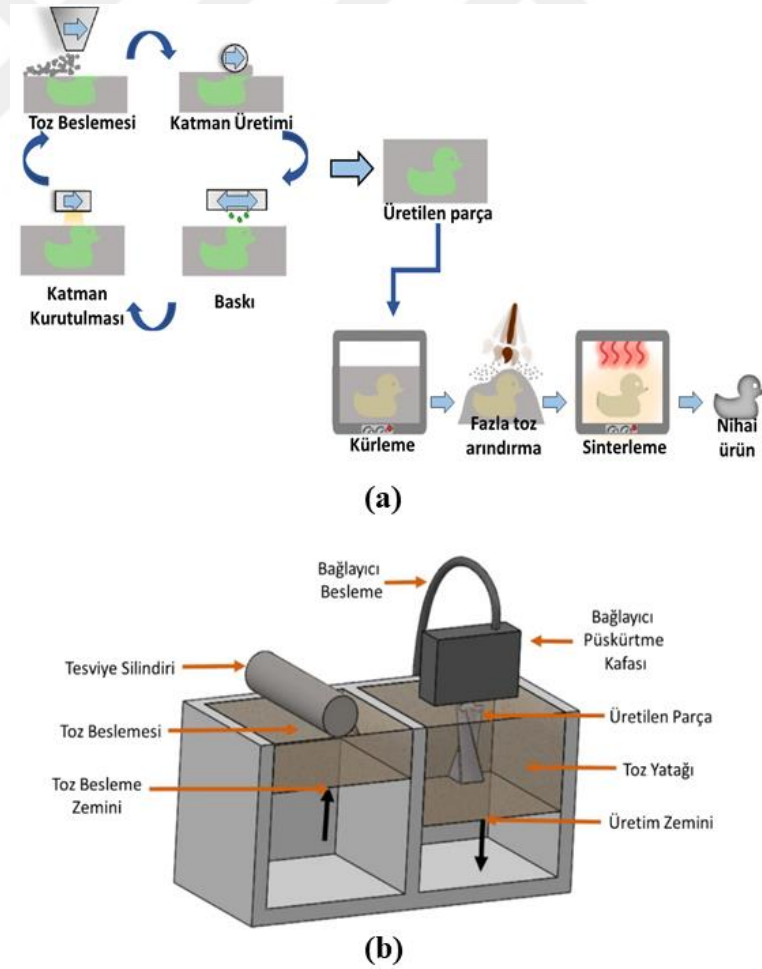
2.2.3. Bağlayıcı püskürtme

Bağlayıcı püskürtme, toz malzemeleri birleştirmek için polimerik bir sıvı bağlama maddesinin seçici olarak biriktirildiği bir eklemeli imalat sürecidir. Üretim platformuna bir toz tabakası yayılır ve bağlayıcılar, bilgisayar destekli çizime (CAD) göre her katmandaki model bilgisini seçici olarak biriktirir. Bağlayıcı püskürtme yönteminde toz yatağına bağlayıcı püskürtülerek üretim gerçekleştirildiğinden dolayı parça malzemesinin küçük bir kısmı baskı kafasından iletilmektedir. Parça malzemesinin çoğu toz yatağında yer alan tozdan oluşmaktadır. Püskürtülen bağlayıcı damlacıkları, hem bağlayıcı sıvısının ve toz parçacıklarının küresel yığınlarını oluşturur hem de malzemenin bir adım önce basılan katmana bağlanmasını sağlamaktadır [39,41,51-53].

Üretim tamamlandığında ortaya çıkan parça bağlanmamış tozu da üzerinde barındırmaktadır dolayısıyla üretimi tam anlamıyla tamamlayabilmek için iki adım

gerekmektedir; ilk olarak fazlalık olan toz madde basınçlı hava ile asıl üründen arındırılır ve daha sonra asıl ürün daha iyi mekanik özellikler kazandırmak için sinterlenir. Bazen bağlayıcının tam olarak oturması ve parçanın mukavemet kazanması için üretim tamamlandıktan sonra parça toz yatağında bırakılır. Bağlayıcının polimer bileşenlerini buharlaştırmak için bir fırınlama işlemi ve ardından toz sinterleme ve/veya infiltrasyon yapılır [54-57].

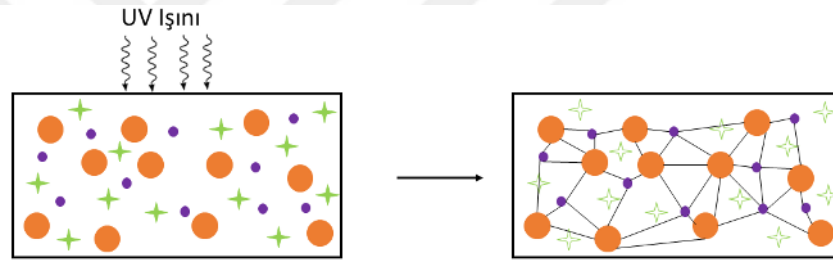
Bu üretim tekniğinde parçalar, toz yatağında bağlanmamış fazla tozlar tarafından desteklendiği için ek destek yapılarına ihtiyaç duymamaktadır. Diğer üretim tekniklerine benzer şekilde, birden fazla parça tek bir katmanda dizilebilir ve tek seferde oluşturulabilir. Bu üretim teknolojisi metalleri/alaşımları (Al bazlı, Cu bazlı, Fe bazlı, Ni bazlı ve Co bazlı alaşımlar dahil) ve seramikleri (cam, kum, grafit vb.) işleme kapasitesine sahiptir. Şekil 2.7(a)'da bağlayıcı püskürtme süreci ve Şekil 2.7(b)'de ise bağlayıcı püskürtme cihazı gösterilmektedir [57-59].



Şekil 2.7. Bağlayıcı püskürtmeli eklemeli imalat yöntemi; (a) bağlayıcı püskürtme süreci, (b) bağlayıcı püskürtme cihazı [58,59]

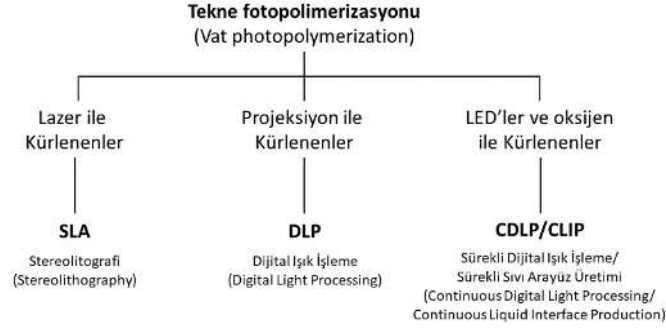
2.2.4. Tekne fotopolimerizasyonu

Fotopolimerizasyon işleminde, ışıkla kürlenebilen bir reçine olan ve bir teknede depolanan fotopolimer görünür ışık veya UV ışını ile işlenmektedir. Bu ışık polimerizasyon reaksiyonunu tetikler ve daha sonrasında polimer zincirleri oluşturur ya da katı bir reçine oluşturmak için bunları çapraz bağlar. Fotopolimer karışımının üç elemanı monomerler, oligomerler ve fotobaşlatıcılardır. Kürleme ışığına maruz kalındığında, fotobaşlatıcılar tarafından monomerler ve oligomerler arasında zincir oluşumu için katalizör görevi gören yaratıcı türler salgılanır. Zincir oluşturan kimyasal-termal süreç geri döndürülemez ve prototipler tekrar sıvı forma dönüştürülemez. Bu prensibi kullanarak, ardışık reçine katmanları, dilimlenmiş bir STL dosyasından kademeli olarak üretilir. Şekil 2.8’de fotopolimerizasyon prensibi gösterilmektedir [60-62].



Şekil 2.8. Sıvı fotopolimer (solda), ışıkla indüklenen polimerizasyon (mor küçük daire monomerleri, turuncu büyük daire oligomerleri, yıldız ise fotobaşlatıcıları sembolize etmektedir.) [63]

Gama ışınları, X ışınları, elektron ışınları, UV ve bazı durumlarda görünür ışık dahil olmak üzere ticari fotopolimerleri kürlemek için çeşitli radyasyon türleri kullanılabilir. Tekne fotopolimerizasyonu sistemlerinde en yaygın olarak UV ve görünür ışık radyasyonu kullanılmaktadır. Fotopolimerizasyon işlemi Şekil 2.9’da görüldüğü gibi kürleme yöntemlerine göre üçe ayrılır. Bunlar; lazer kullanarak kürleme yapanlar (Stereolitografi - SLA), dijital projeksiyon (Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing - DLP)) ile kürleme yapanlar, LED ve oksijen kullanarak kürleme yapanlar (Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Digital Light Processing - CDLP)/ Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi (Continuous Liquid Interface Production - CLIP)) şeklindedir [63,64].



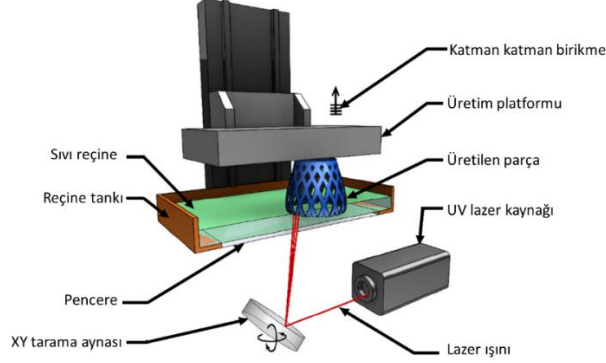
Şekil 2.9. Fotopolimerizasyon teknikleri [63]

2.2.4.1. Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi geliştirilen ilk üç boyutlu baskı teknolojisidir ve fotopolimeri bir ultraviyole (UV) lazer ışını ile k rleme tekniğini kullanmaktadır. Stereolitografi son derece doğru ve hassas bir teknik olup ana dezavantajı ise kullanılacak sınırlı malzeme seçeneğidir. Fotopolimer malzeme reçine tankında tutulurken, UV lazer ışını $x - y$ düzleminde hareket etmekte ve baskı tabanı ise z yönünde hareket etmektedir. SLA için yukarıdan aşağıya yaklaşım ve aşağıdan yukarıya yaklaşım olmak üzere iki tür yazdırma yöntemi vardır. Yukarıdan aşağıya baskı yöntemi için, bir UV lazer ışını aşağı doğru yönlendirilir ve reçine yüzeyindeki tasarım yolu boyunca ilerler. Bu hareket reçineyi sertle tirir ve reçine yüzeyinden istenilen derinlikte tutulan baskı tabanı üzerinde bir baskı tabakası oluşturur. İlk katman yazdırıldıktan sonra baskı tabanı aşağı indirilir ve bir sonraki katmanın baskısı bir önceki katmanda olduğu gibi ba lar. Aşağıdan yukarıya yaklaşım için, bir UV lazer ışını yukarı doğru yönlendirilir. Reçine tankı, lazerin geçmesine izin vermek için tankın altında bir açılır pencereye sahiptir. Baskı tabanı ve reçine tankı arasındaki boşluk, katman yüksekliğini  l er. UV ışını, baskı tabanının altındaki reçineyi sertle tirir ve her katman basıldıktan sonra baskı tabanı, ayarlanan katman yüksekliğine göre yükseltilir. Taban katmanının baskı tabanına yapışmaması bu işlemden baskı boyutunu sınırlamaktadır [65-67].

Baskı platformu reçineye daldırılırken, lazer ışını yapı alanını işaretler ve alanları STL dosyasına göre sertle tirir. İlk katman oluşturulduktan sonra, makinenin yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya bir işlem kullanmasına bağlı olarak platform, bir katmanın yüksekliğine eşit sabit bir miktarda z yönünde indirilir veya yükseltilir. Sertleştirme işlemi, bir üç boyutlu model tamamlanana kadar katman katman tekrarlanır. Bir katmanın yüksekliği 12 ila 150 μm arasında değişir genellikle 100 μm en çok seçilen katman yüksekliğidir. Standart SLA yazıcıların baskı hızı 10-20 mm/saat aralığındadır.

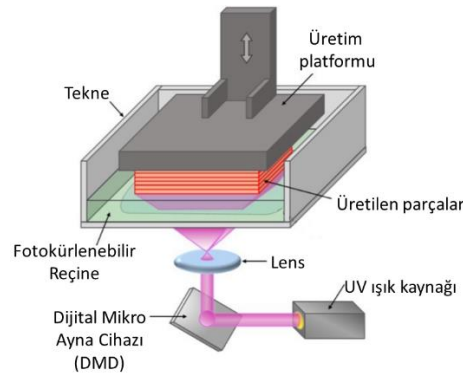
SLA teknolojisine sahip bir üç boyutlu yazıcının prensibi Şekil 2.10’da gösterilmektedir. SLA üretiminin doğruluğu, kütleme noktasındaki lazer ışınının çapı, yani nokta boyutu ile ilgilidir [63].



Şekil 2.10. Stereolitografi makinesinin komponentleri

2.2.4.2. Dijital ışık işleme (DLP)

DLP teknolojisini kullanan sistemler yalnızca kütleme yöntemleri yönünden SLA yöntemini kullanan sistemlerden ayrılmaktadır. DLP sistemleri lazer kaynağını yansıtmak için ayna yerine dijital ışık projektörü kullanmaktadır. SLA teknolojisi ile karşılaştırıldığında, her katman tamamen dijital ekrandan yansıtılan kütleme ışığına maruz kaldığı için DLP işlemi daha hızlıdır. DLP, tüm bir katmanı birkaç saniyede aynı anda iyileştirmeye yarayan bir ışık maskesi yansıtmak için dijital bir mikro ayna cihazından (Digital Micromirror Device - DMD) veya sıvı kristal ekranlardan (LCD - Liquid Crystal Display) yararlanır. DLP tekniği, projeksiyon stereolitografisi ya da maske-projeksiyon tekne fotopolimerizasyonu (Mask-Projection Vat Photopolymerization - MPVP) olarak da adlandırılmaktadır. DLP teknolojisine sahip bir üç boyutlu yazıcının prensibi Şekil 2.11’de gösterilmektedir [68,69].

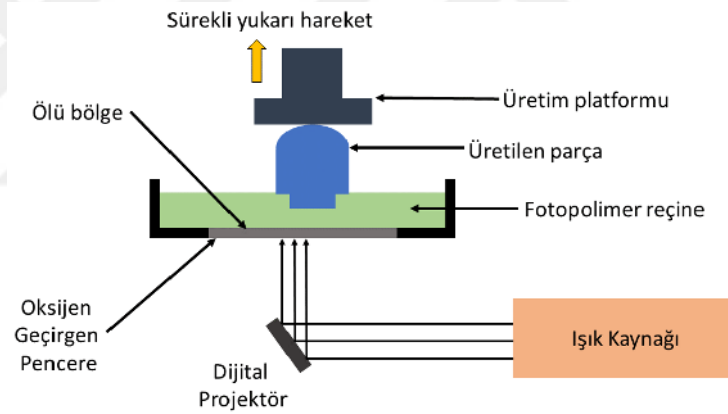


Şekil 2.11. DLP tekniğini kullanan cihazların komponentleri [69]

2.2.4.3. Sürekli dijital ışık işleme/Sürekli sıvı arayüz üretimi (CDLP/CLIP)

CDLP/CLIP teknolojisi, DLP teknolojisine dayalı bir yeniliktir. Özellikle SLA ve DLP teknolojisinden farklı olarak CDLP/CLIP, normal cam pencere yerine LED'li dijital projeksiyon ve oksijen geçirgen pencere kullanır. Bu oksijen geçirgen pencere, insan saç kalınlığında sözde ölü bir bölge oluşturur, bu bölge sıvı reçinenin basılı parçanın ara yüzü ile pencere arasında akmasını sağlar. Bu kurlenmemiş reçine akışı, yazdırılan parçanın çözünürlüğünü önemli ölçüde artırmaktadır [63].

Ayrıca, katman katman yönteminin aksine, CDLP/CLIP makineleri, yapı platformunun sürekli hareketi ile tasarlanmıştır, böylece saatte birkaç yüz milimetre hızlarda kesintisiz prototip baskısına izin vermektedir. Kesintisiz işlem sayesinde katman bağlantısı sorunu ortadan kalkar ve katman katman görüntü en aza indirilir. Bu nedenle, üretilen parçalar izotropik mekanik özelliklere sahiptir. Şekil 2.12'de CDLP/CLIP teknolojisi gösterilmektedir [63].

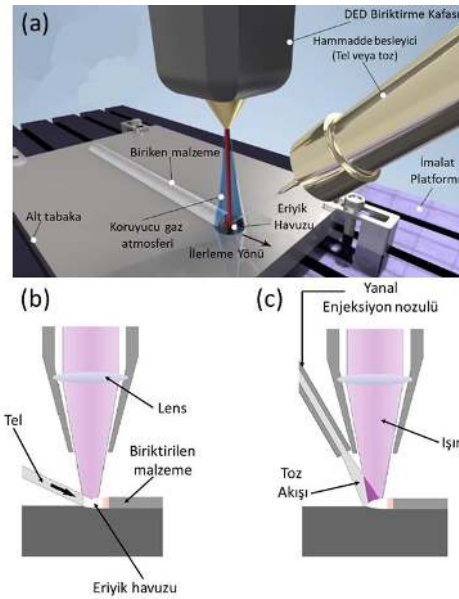


Şekil 2.12. CDLP/CLIP tekniği [67]

2.2.5. Yönlendirilmiş enerji biriktirme

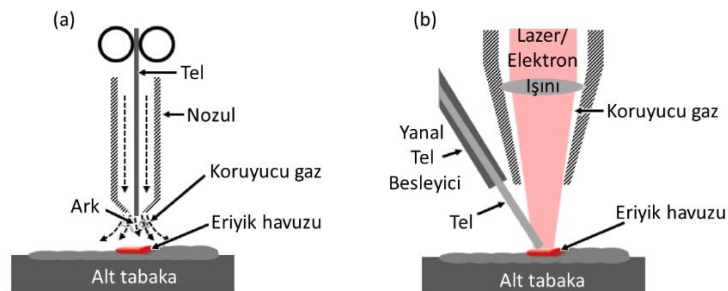
Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi, lazer, plazma arkı veya elektron ışını gibi dar odaklı termal enerji kaynakları tarafından beslenerek metal tozu veya metal tel malzemeleri eriterek biriktiren bir eklemeli imalat yöntemidir. Termal enerji kaynağı üretimin aşamasına göre bir önceki katmana ya da ilk katmana odaklanır. Eş zamanlı olarak hammadde (tel ya da toz türleri) termal enerjinin odaklandığı bölgeyi besler. Malzemenin biriktirildiği alt tabaka, ham madde ile aynı anda ısıtıldığından, hareketli bir erimiş havuz oluşur ve malzeme katman katman biriktirilir. Eriyik havuz soğutulur malzemenin katılaşması ile katman üretilir. Bu işlemler CAD verilerine göre tekrarlanarak metalik parçaların üretimi sağlanır. Şekil 2.13'te yönlendirilmiş enerji

biriktirme yöntemi ve bu yönleme ait toz besleme ve tel besleme yöntemleri gösterilmektedir [70-73].



Şekil 2.13. Yönlendirilmiş enerji biriktirme tekniği; (a) DED çalışma prensibi ve bileşenleri, (b) tel beslemeli sistem, (c) toz beslemeli sistem [48,70]

Bir toz besleme cihazı ve bir lazerden oluşan DED işlemi, lazer eklemeli imalat (LAM-DED) işlemi olarak bilinir. Tel besleme tipi DED prosesleri, kullanılan termal enerjilere göre tel ve ark eklemeli imalat (WAAM), tel ve lazer eklemeli imalat (WLAM) ve tel ve elektron ışını eklemeli imalat (WEAM) prosesleri olarak sınıflandırılır. LAM-DED, WAAM ve WLAM prosesleri, biriktirme sırasında erimiş havuzun oksidasyonunu önlemek için bir koruyucu gaz kullanır. WEAM yöntemi, LAM-DED, WAAM ve WLAM işlemlerinden farklı olarak bir vakum fırınında çalıştırılır. WAAM sürecinin yatırım maliyeti, LAM-DED, WLAM ve WEAM süreçlerinden nispeten daha ucuzdur. DED sistemleri hammaddeyi eriyik havuzuna iletmek için Şekil 2.14'te gösterildiği gibi eş eksenli (co-axial) ve yanal (lateral) besleme teknolojilerini kullanmaktadır.

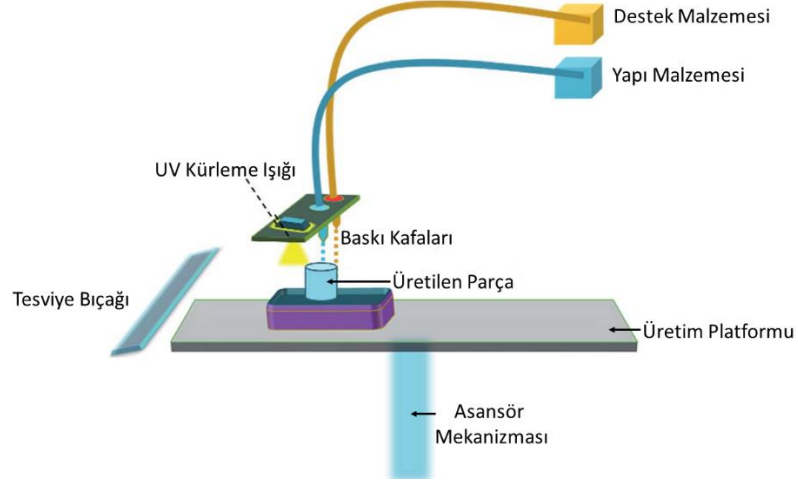


Şekil 2.14. DED süreçlerinin tel besleme metodolojileri: (a) eş eksenli besleme (WAAM), (b) yanlal besleme (WLAM ve WEAM) [74]

2.2.6. Malzeme püskürtme

Malzeme Püskürtme (MJT – Material Jetting), "ham madde damlacıklarının seçici olarak biriktirildiği" eklemeli imalat teknolojileri için bir ISO/ASTM sınıflandırmasıdır. Malzeme püskürtme, iki boyutlu mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzer bir yöntemle nesneler oluşturmaktadır. Bu teknik, “3B baskı” (3DP – three dimensional printing) teriminin kökenini oluşturmuştur. Yazıcı tasarımı üreticiden üreticiye biraz farklılık gösterse de, malzeme püskürtmenin genel bir şematik gösterimi Şekil 2.15'te yer almaktadır. Malzeme püskürtme tekniğinde fotopolimer malzemeleri depolamak için hava içermeyen tanklar kullanılır ve bu tanklar fotopolimerin tanktan nozüle iletildiği iletim hattında fotopolimeri ısıttıktan sonra yapı platformunda çok ince bir tabaka oluşturan damlacıklar halinde biriktirilir. Kürlleme için yapı platformundaki erimiş malzeme üzerine ultraviyole (UV) ışık yayılır. Bu fotopolimerizasyon/foto-kürlleme işleminde, sıvı halde monomerleri/oligomerleri sertleştirmek için belirli bir dalga boyunda bir ışık kaynağı kullanılır. Malzeme püskürtme tekniğinde 190 ile 400 nm arasında dalga boyuna sahip bir ışık kaynağı kullanılmaktadır [76,77].

Sürekli bir malzeme akışının aksine, damlacıklar yalnızca gerektiğinde dağıtılır ve nozuldeki termal veya piezoelektrik eyleyicilerden gelen bir basınç değişikliği ile serbest bırakılır. Termal eyleyiciler, damlacıkları çok hızlı bir şekilde biriktirir ve damlacığı oluşturmak için ince bir film direnci kullanır. Piezoelektrik eyleyiciler, daha geniş bir malzeme yelpazesinin kullanılmasına izin verdiği için genellikle daha iyi kabul edilmektedir. Bir tabaka kürlendikten sonra, yapı platformu belirli bir tabaka kalınlığı miktarına kadar indirilir ve bir önceki tabakanın üzerine yeni sıvı malzeme püskürtülür. Birbirini takip eden her katmanı sertleştirdikten sonra, tam ölçekli bir parça tamamen oluşturulur. Malzeme püskürtme tekniğinde sıvı veya erimiş malzeme kullanıldığından özellikle çıkıntı bölgelerinde jel benzeri bir destek yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu destek yapıları sodyum hidroksit çözeltisi banyosunda sonikasyon, ısıtma veya yüksek basınçlı su jeti gibi farklı yöntemler kullanılarak parçadan çıkarılır [76,78]



Şekil 2.15. Malzeme püskürtme yöntemine ait sistem bileşenleri [79]

Malzeme püskürtme teknolojisi, diğer polimer baskı tekniklerine göre avantajları nedeniyle polimer baskı alanında öne çıkan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu teknoloji, yüksek kaliteli parçaların basılmasına, daha az belirgin olan merdiven efektlerine (katman katman görünüm) ve ince duvar özelliklerine izin veren ince katman kalınlıklarını uyarlamamızı sağlamaktadır. Katman kalınlıkları 16 μm kadar düşük olabilmektedir. Tabla konumu, katman kalınlığı, yapı yönelimi, yüzey kalitesi, malzeme türü ve uygulanan son işlemler, malzeme püskürtme ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu, yüzey pürüzlülüğünü ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir [76,77].

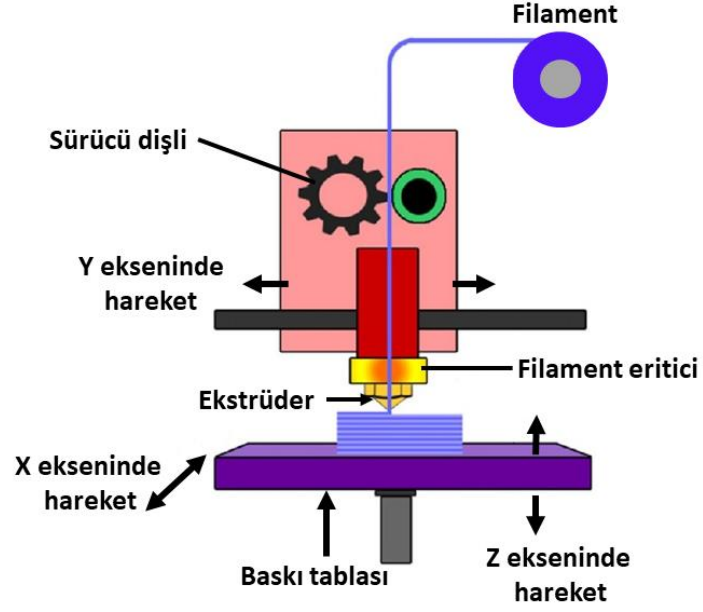
Ayrıca PLA, ABS, poliamid gibi farklı malzemeler ve bunların kombinasyonları, çoklu malzeme yaklaşımı olarak adlandırılan malzeme püskürtme teknolojisinde tek bir yerde birleştirilebilir. Çoklu malzeme yaklaşımı, belirli amaçlar için kompozit parçalar üretmede kullanılabilir. Bu tekniğin avantajları, iyi yüzey kalitesi, yüksek çözünürlük, tam renkli parçalara izin vermesi, çoklu malzeme yaklaşımına olanak sağlamasıdır. Malzemenin damlalar halinde biriktirilmesi gerektiğinden, düşük erime sıcaklığına sahip malzemeler kullanılabilecektir, dolayısıyla kullanılabilecek malzeme sayısı sınırlanmaktadır. Malzeme püskürtme işleminde hammadde olarak plastik ve polimerler (Polipropilen, HDPE (high density polyethylene), PS (polystyrene), PMMA (polymethyl methacrylate), PC (polycarbonate), ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene) ve HIPS (high impact polystyrene)) kullanılmaktadır [76,77,80].

2.2.7. Malzeme ekstrüzyonu

Malzeme Ekstrüzyonu (ME), ASTM (American Society of Testing and Materials) standardına dayalı eklemeli imalat tekniklerinden biridir. Malzeme ekstrüzyonu ile eklemeli imalat literatürde Eriyik Biriktirme Modellemesi (FDM – Fused Deposition Modelling) veya Eriyik Filament Üretimi (FFF – Fused Filament Fabrication) olarak da bilinmektedir. Mevcut eklemeli imalat teknikleri arasında FDM/FFF tekniği en popüler olanıdır. Teknoloji otuz yıl önce tanıtılsa da özellikle son zamanlarda daha fazla ilgi görmeye başlamış ve otomotiv, havacılık, elektronik ve biyomedikal gibi çok çeşitli alanlar da dahil olmak üzere pek çok sektöre yayılmıştır. Eriyik biriktirme modelleme (FDM) teknolojisi, pahalı kalıplar ve aletler kullanmadan serbest biçimli imalat için güvenilir bir yöntem olduğundan birçok avantaj sunmaktadır. İşlem basit ve kullanımı kolaydır ve malzemelerin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır; böylece düşük malzeme israfına yol açmamaktadır. FDM tekniğini kullanmanın en güçlü yönlerinden biri, çeşitli termoplastik polimer türleriyle uyumlu olmasıdır [81,82].

En popüler ve kararlı malzemeler ABS (akrilonitril bütadien stiren) ve PLA'dır (polilaktik asit). Bugüne kadar, FDM yazıcılar, polikarbonatlar (PC), polistiren (PS), poliamid, polieterimid (PEI) ve polietereterketon (PEEK) gibi diğer termoplastikleri basabilme yeteneğini göstermiştir. Ayrıca, gelişmiş mekanik özellikler, biyouyumluluk veya iletkenlik sundukları için, polimer matrislere belirli malzemeler ekleyerek kompozit filamentler oluşturmaya yönelik çalışmalar da yer almaktadır [83-85].

FDM baskı işlemi sırasında, polimerik malzeme bir filament besleme mekanizması aracılığıyla nozule gönderilir, ardından bir ısıtıcı katı termoplastik filament malzemeyi eriyik hale dönüştürür ve daha sonra eriyik malzeme nozul tarafından bir taban plakasına ekstrüde edilir. Nozul, x–y düzleminde yatay olarak hareket eder. Katman biriktirme işleminin tamamlanmasından sonra, taban plakası dikey yönde (z eksen) hareket eder. Dilimleme işlemi sırasında belirlenmiş bir artışla bir katmanın kalınlığı kadar iner. Ardından, 3B şeklin tamamı tamamlanana kadar eriyik filament biriktirme işlemi devam eder. Şekil 2.16'da FDM/FFF tekniği ile baskı işlemi şematik olarak gösterilmektedir [86,87].



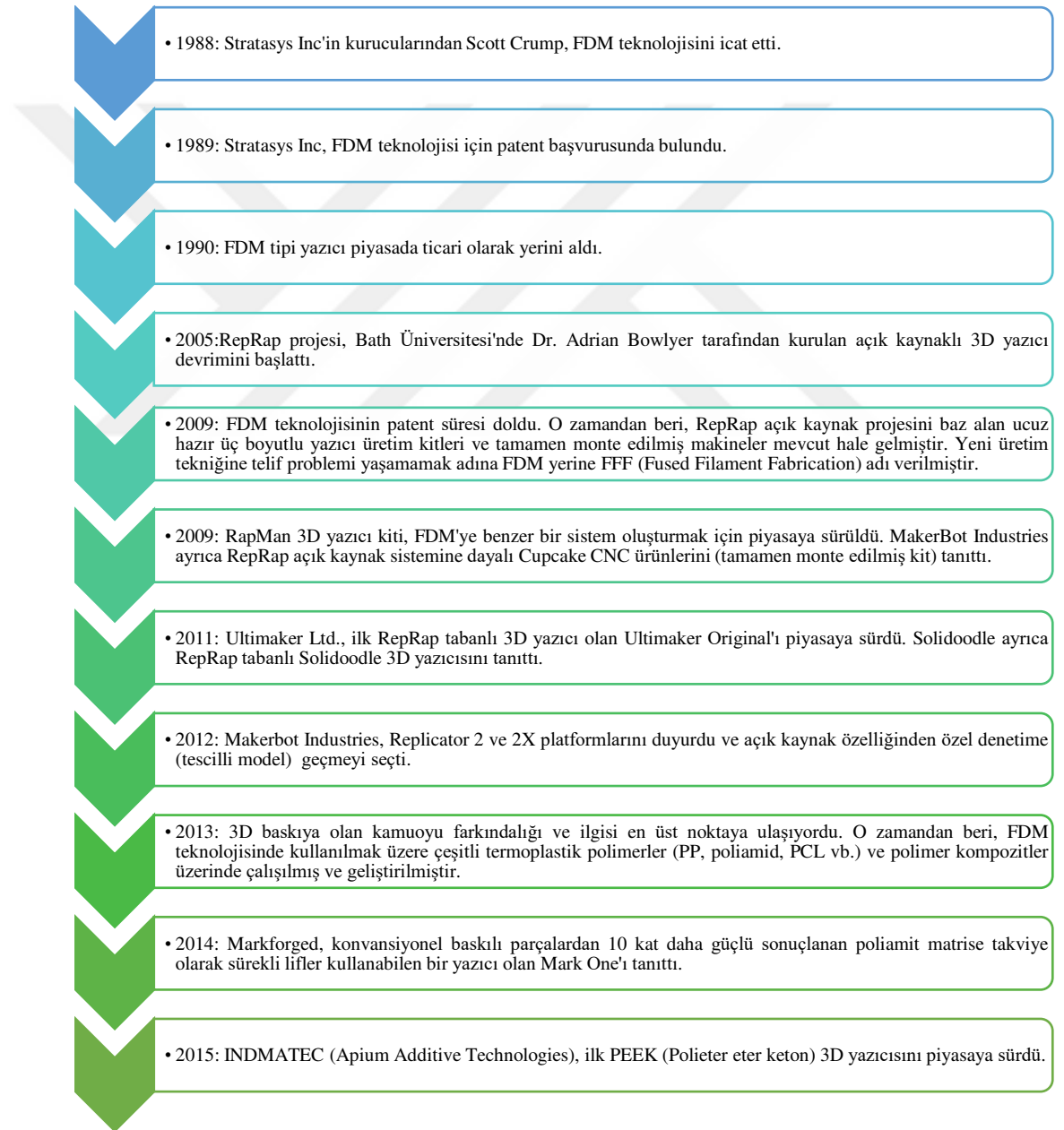
Şekil 2.16. FDM/FFF üretim tekniğinin şematik gösterimi [87]

2.3. FDM/FFF Tekniğinin Gelişim Süreci

FDM teknolojisi 1989’da Scott Crump önderliğinde Stratasys şirketi tarafından geliştirilmiştir. FDM ve FFF teknikleri arasında herhangi bir fark bulunmamaktadır, FDM isminin patent hakkının Stratasys firmasında bulunmasından dolayı iki farklı adlandırma yapılmıştır. FFF adlandırması, Stratasys şirketinin FDM patentinin sona ermesinden sonra yaygınlaşmıştır [82].

2004 yılında Bath Üniversitesinden Adrian Bowyer, kendi parçalarının önemli bir kısmını üretebilecek RepRap (Replicating Rapid Prototyper) adında hızlı prototipleme makinası oluşturmaya başlamıştır. Bu teknolojiyi isteyen herkes için erişilebilir kılmayı amaçlamıştır. RepRap, açık kaynaklı, kendi kendini kopyalayan bir hızlı prototipleme makinesidir. Çeşitli termoplastik polimerlerden mühendislik bileşenleri ve diğer ürünleri üretmek için erimiş filament üretimini kullanan bir robottur. RepRap, kendi parçalarının önemli bir kısmını otomatik olarak yazdırabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kendi kendine üretilmediği parçalar, dünya çapında ucuza temin edilebilen standart mühendislik malzemeleri ve bileşenleri olarak seçilmiştir. Makine ücretsiz ve açık kaynaklı olduğu için, telif ücreti ödmeden herkes, bu kopyaları çoğaltmak için RepRap makinelerini kullanarak kendileri veya başkaları için herhangi bir sayıda kopyasını üretebilmektedir [88].

Üç boyutlu baskının ilerlemesi ve gelişmesi, MakerBot ve Ultimaker gibi öncü şirketler tarafından geliştirilen düşük maliyetli ev tipi üç boyutlu yazıcılarının pazara girmesinden kaynaklanmaktadır. Şu anda, FDM tipi üç boyutlu yazıcılar, dünya çapında yüzden fazla üretici ve distribütör ile oldukça yaygın hale gelmiştir. Hammaddeler olarak filamentleri kullanma yeteneğinin yanı sıra orta düzeyde bir erime sıcaklığına sahip olma özelliğinden yararlanan FDM, ağırlıklı olarak termoplastik polimerlerin ve bunların kompozitlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 2.17’de FDM/FFF tekniğinin icadından bugüne kadar meydana gelmiş olan önemli gelişmeler gösterilmektedir [87].



Şekil 2.17. FDM/FFF teknolojisinde yaşanan önemli gelişmeler [87]

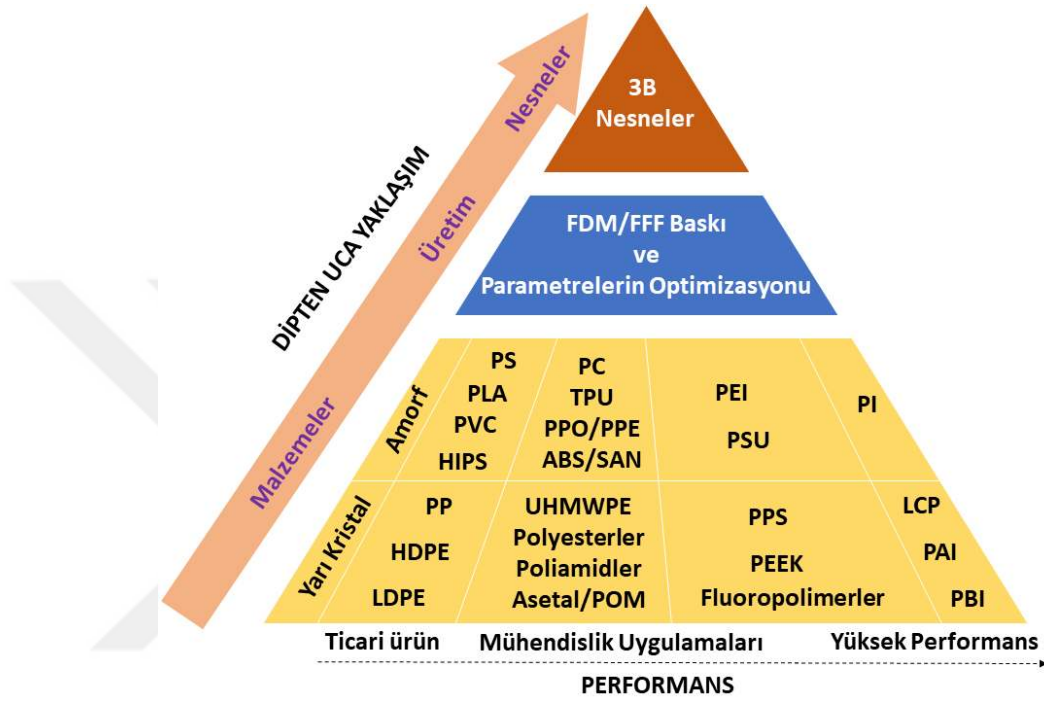
2.4. FDM/FFF Tekniğinde Kullanılan Malzemeler

FDM/FFF tipik olarak termoplastik filamentleri kullanmaktadır, çünkü bu malzemeler ısıtılmış bir ekstrüder vasıtasıyla camsı geçiş sıcaklığında veya bu sıcaklığın üzerinde eriyik olarak ekstrüde edilebilmekte ve daha sonra bir sonraki katmanın üzerine biriktirilip katı bir madde oluşturabilmektedir. Filamentlerin nispeten düşük erime sıcaklığı (T_m) ve uygun şekilde yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olmak üzere en az bu iki kriteri sağlaması gerekmektedir. Düşük erime sıcaklığı (T_m) üç boyutlu baskıyı daha ekonomik hale getirmektedir, yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ise polimer ekstrüzyon işleminden sonra yeterince hızlı katılaşabilmesini sağlamaktadır [89].

Bir FDM/FFF yazıcıda kullanılacak herhangi bir termoplastik polimer için temel gereksinimlerden bir diğeri ise makinenin donanımında veya yazılımında herhangi bir büyük değişiklik olmaksızın polimerin mevcut FDM/FFF kurulumuyla uyumluluğu ve uygunluğudur. FDM/FFF işlemi baskı için tipik olarak 1,75 mm veya 3,00 mm çapındaki filamentleri kullanır. Yazının baskı ayarları optimum şekilde ayarlandığı sürece filament çapı seçimi baskı kalitesini etkilemez. Daha büyük boyutlu bir filament çapı (3mm) daha güçlü bir filament sağlar ancak daha kalın bir filamenti nozule aktarmak için daha fazla kuvvet uygulanması gerekirken aynı zamanda aktarım da yavaş olacaktır. Bu yüzden genellikle, tüm makara boyunca 1,75 mm'lik sabit bir filament çapı tercih edilir. Bununla birlikte, üretim süreci nedeniyle, çapın korunacağı her zaman bir tolerans vardır. Genellikle FDM/FFF yazıcılar için 1,75 mm çaplı filamentler $\pm 0,1$ mm çap toleransına sahiptir [87,90].

İzin verilen toleransın ötesinde bir filament çapı ciddi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Filament çapındaki bir azalma, ince filamanı yetersiz basınçla kavraması nedeniyle malzemenin girişinde arızaya neden olabilir ve bu da filamentin eritici bölüme akışını engelleyebilmektedir. Öte yandan, filament çok genişse, motor filamanı itemez veya filament nozul açıklığına sığmayabilir. Ekstrüder dişlisi ayrıca plastiğin yüzeyini parçalayabilir ve sonucunda ekstrüderi durdurabilir. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi FDM/FFF tekniği için kullanılabilecek pek çok termoplastik filament bulunmaktadır, ancak bunlar arasında en çok kullanılan filamentler 20 – 60 MPa aralığında çekme mukavemetine sahip akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), polikarbonat (PC) ve poliamidleri (PA) içermektedir. Termoplastikler amorf veya yarı kristal olarak sınıflandırılabilir; ABS ve PC amorf olarak kabul edilirken PLA ve PA yarı

kristal olarak kabul edilmektedir. Bu termoplastikler en yaygın olarak düşük maliyetleri, biyouyumlulukları, güvenilirlikleri ve potansiyel ölçeklenebilirlikleri nedeniyle kullanılmaktadır. Daha spesifik olarak, PLA filamentler düşük termal genleşme katsayısı ve düşük baskı sıcaklığı nedeniyle genellikle optimal bir seçimdir. Ayrıca PLA, ABS'ye kıyasla daha yüksek çekme mukavemetine ve daha iyi yüzey kalitesine sahiptir [89,90].



Şekil 2.18. FDM/FFF tekniğinde kullanılan filament malzemeler [89]

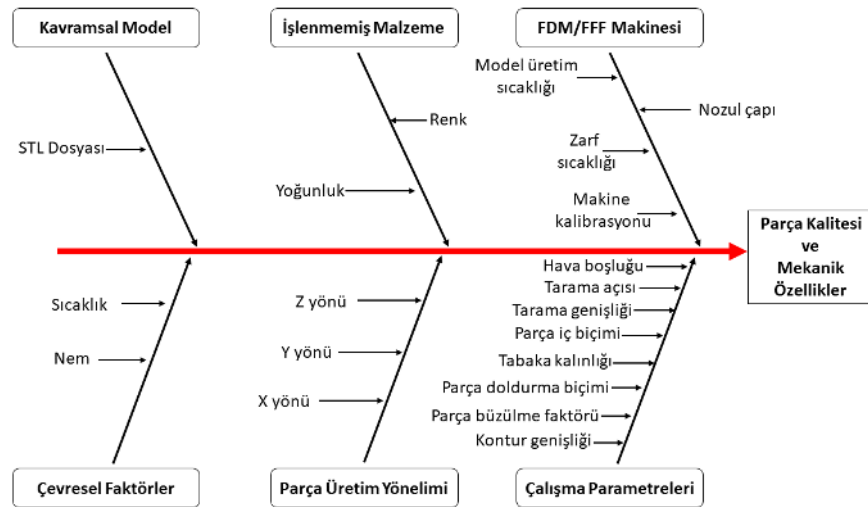
Düşük maliyetli termoplastiklerin avantajları olsa da, nihai baskılı yapı ve bu yapının verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilecek performans eksikliklerine sahip oldukları bilinmektedir (örneğin PLA düşük bir ısı direncine ve düşük ısıyı dağıtma kabiliyetine sahiptir). Bu nedenle FDM/FFF için daha iyi mekanik özelliklere sahip polimerler istenmektedir. Daha yüksek mukavemet ihtiyacını karşılamak için polietereketon (PEEK) ve politetrafloroetilen gibi yüksek performanslı termoplastiklerin yanı sıra bismaleimid (BMI) gibi yüksek performanslı termosetler kullanılabilir; ancak genellikle tipik ticari polimerlerden daha yüksek maliyet gibi büyük bir dezavantaja sahiptirler ve endüstriyel ihtiyaçları karşılamak için üretimi büyütmeyi zorlaştırmaktadırlar [81].

Daha yüksek mukavemet ihtiyacını karşılamak ve yüksek performanslı termoplastik filamentlere göre nispeten daha uygun maliyetli malzemeler üretebilmek için polimer kompozit formunda filamentler geliştirilmektedir. Seçilen çeşitli takviyelerin

polimer matrisine dahil edilmesiyle, bileşenlerin tek başına elde edemeyeceği benzersiz bir özellik kombinasyonuna sahip bir filament sistemi elde edilebilmektedir. Çoklu nozul kullanımı veya polimer matrisine önceden takviye ile kompozit filamentlerin üretimi gerçekleştirilir. Bu kompozit malzemeler, yüksek performanslı termoplastiklerle karşılaştırılabilir ve/veya daha üstün ayarlanabilir mekanik özellikler sunar. Kompozit filament üretiminde malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatabilecek istenmeyen gözenekliliğe dikkat etmek gerekmektedir [87].

2.5. FDM/FFF Tekniğinde Baskı Kalitesini Etkileyen Faktörler

Optimum üretim koşullarının belirlenmesi; ürünlerin kalitesini artırmak, boyutsal hassasiyeti iyileştirmek, kabul edilemez atıklardan ve büyük miktarda hurdadan kaçınmak, verimlilik oranlarını artırmak ve üretim süresini ve maliyetini azaltmak adına önemli bir rol oynamaktadır. FDM/FFF süreci, hem yüzey kalitesini (örneğin, boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü) hem de ürünün mekanik özelliklerini etkileyen pek çok parametreyi barındırmaktadır. FDM/FFF teknolojisi için yeni malzemelerin başarılı bir şekilde üretilmesi için baskı sıcaklığı, baskı hızı, üretim yönelimi, tarama yönelimi/açısı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu gibi işlem parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Ancak FDM/FFF ile üretim süreci, parça kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyecek çok sayıda çelişkili parametrenin varlığından dolayı optimal parametreleri belirlemede çok zorluk sergileyen karmaşık bir süreçtir. Şekil 2.19’da FDM/FFF sürecinde çalışılması ve optimize edilmesi gereken tüm süreç değişkenlerini göstermektedir [87,91-94].

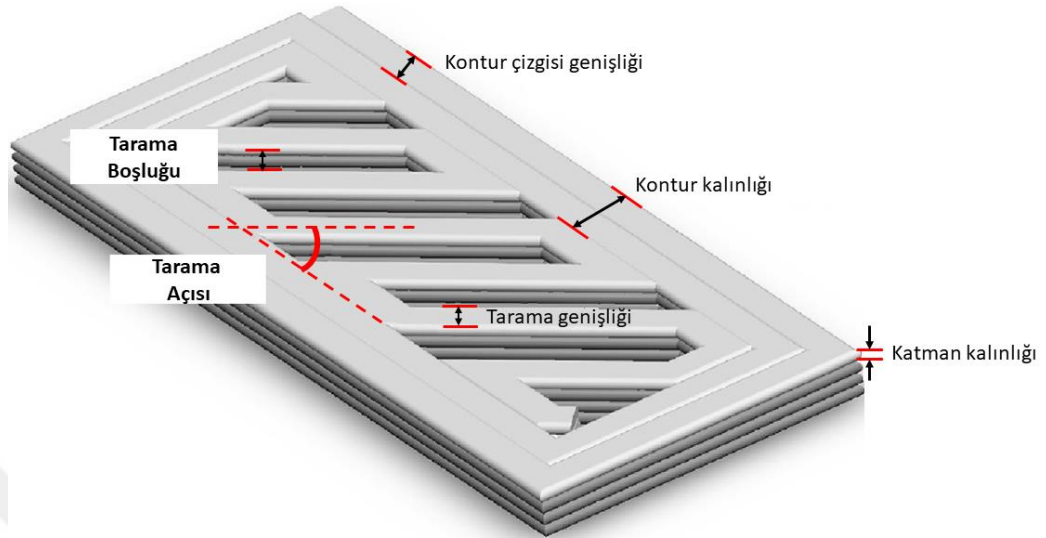


Şekil 2.19. FDM/FFF işleme parametrelerinin balık kılçığı diyagramı [95]

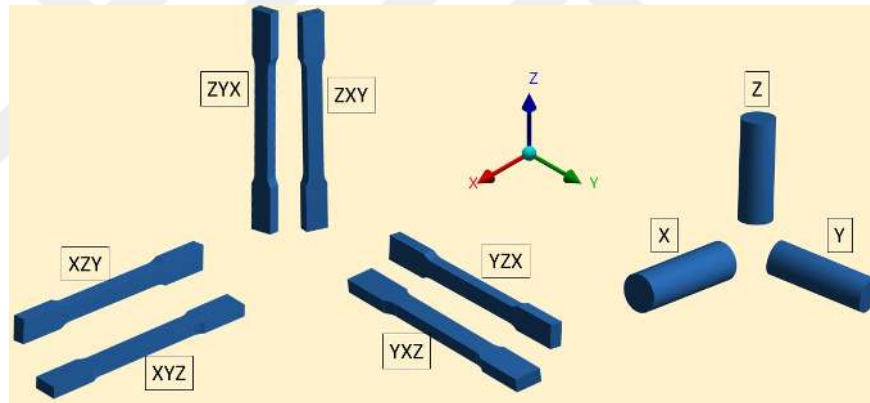
Şekil 2.20'de gösterilen bazı ana parametreler şu şekilde tanımlanmaktadır [87,91-94];

- **Katman kalınlığı [mm]:** 3B yazdırılan parçanın her diliminin yüksekliğidir.
- **Tarama açısı [°]:** Nozulun erimiş termoplastikleri her katman için satır satır biriktirdiği açıdır ve 0° ile 180° arasında değişir.
- **Kontur/kabuk çeperleri:** Parçanın dış kaplaması ve iç deliği için kullanılacak en dıştaki kabuklardır. Kontur/kabuk çeperi sayısı ve kontur genişliği, kabuk kalınlığını değiştirmek için kullanılabilir.
- **Tarama genişliği [mm]:** Ekstrüde edilmiş filamentin genişliğini ifade etmektedir.
- **Hava boşluğu/Tarama boşluğu [mm]:** Yan yana iki ekstrüde filament arasındaki açıklığı ifade etmektedir.
- **Biriktirme hızı [mm/dak]:** Nozulün hareket ettiği hızdır, bu parametre doğrudan baskı hızıyla ilgilidir.
- **Dolgu yoğunluğu [%]:** Parça içindeki malzeme miktarını ifade etmektedir. Dolgu yüzdesi ne kadar yüksek olursa, parçanın mekanik özellikleri o kadar iyi olur; ancak, bu durumda baskı süresi daha uzun olacak ve daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulacaktır.
- **Platform/yatak sıcaklığı [°C]:** Üretimin gerçekleştiği tabla platformunun sıcaklığıdır. Bu parametre özellikle birinci tabaka üzerinde ekstrüde edilen filamentin soğuma hızını belirler ve birinci tabakanın iyi yapışması ve bükülme etkisinin önlenmesi için önemli bir parametredir.
- **Nozul sıcaklığı [°C]:** Malzemenin ekstrüde edildiği sıcaklığı ifade etmektedir. Sıcaklık normalde malzemelerin erime noktasından birkaç santigrat derece daha yüksektir.
- **Numune/yapı yönlendirmesi:** Yapı platformundaki yazdırılan parçanın x, y ve z eksenleri etrafındaki yönünü belirtmektedir. Dikdörtgen ve simetrik olmayan test numuneleri için yönelimi tanımlamak için üç harf (X, Y, Z) gereklidir. İlk harf, en uzun toplam boyutlara paralel eksenini belirtir. İkinci harf, ikinci en uzun toplam boyutun eksenini, üçüncü harf ise kuponun en kısa boyutun eksenini belirtmektedir. Şekil 2.21'de farklı varyasyonları gösterilen XYZ işaretli bir numune için, en uzun boyutunun X eksenine

hizalandığı, ikinci en uzun boyutunun Y eksenine hizalandığı ve en kısa toplam boyutunun Z eksenine hizalandığı anlamına gelmektedir.



Şekil 2.20. Baskı kalitesini etkileyen parametreler [91]



Şekil 2.21. Farklı numune yönelimleri [91]

3. LİTERATÜR TARAMASI

Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesi ve özellikle FDM tekniğinin oldukça yaygın ve kolay ulaşılabilir duruma gelmesi ile bu tekniği kullanarak kompozit malzeme üretimi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan çalışmalar artmaktadır. Bu çalışma kapsamında FDM tekniği ile üretilen bal peteği yapılar ve sandviç kompozitler ile ilgili makaleler incelenmiştir.

3.1. FDM Tekniği Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Yapılar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Giriş kısmında bahsedildiği üzere bal peteği yapıları otomotiv ve havacılık gibi benzer mühendislik alanlarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Ancak bu tür yapıların geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zahmetli ve pahalıdır. Böyle bir dezavantaj, eklemeli imalat (AM) süreçlerinin benimsenmesiyle büyük ölçüde hafifletilebilmektedir.

Pollard vd. (2017), FDM tekniğini kullanarak ABS ve PLA olmak üzere iki malzemeden üretilen ince hücre duvarlarına sahip bal peteği çekirdeklerin çekme ve basma dayanımlarını incelemişlerdir. FDM ile üretilen ince hücre duvarlarının katmanları arasındaki bağ mukavemeti, çekme testi ile değerlendirilmiştir. Çekme testi sonuçları, daha kalın hücre duvarlarının, daha ince hücre duvarlarından daha düşük bir akma noktası ile plastik deformasyona daha duyarlı olduğunu göstermiştir, yani kalın hücre duvarlı FDM bileşenleri, daha ince hücre duvarlı numunelere kıyasla daha düşük bir akma noktası ile daha sünek bir kırılma sergilemiştir. FDM bal peteği çekirdeklerinin basma testi de daha kalın hücre duvarlı numunelerin, çekme testiyle tutarlı olarak daha sünek bir şekilde davrandığını göstermiştir. FDM ile üretilen çekirdeklerinin ezilmeye uğradığı maksimum kuvvet, Nomex peteğinden önemli ölçüde daha büyük olarak belirlenmiştir [96].

FDM tekniği ile üretilen parçalar herhangi bir güçlendirici uygulama ya da katkı malzemesi olmadan mekanik açıdan zayıftırlar. Galatas vd. (2018), FDM teknolojisinin insansız hava aracı (İHA) gibi hafiflik, yüksek mukavemet ve sertliğin gerekli olduğu birçok uygulamanın fonksiyonel parçalarında kullanımını kısıtladığını belirtmişlerdir. Galatas vd. gerçekleştirdikleri çalışmada İHA yapıları için karbonfiber takviyeli polimer (CFRP) yüzey malzemesine ve ABS filamentten üretilmiş çekirdek malzemesine sahip bir sandviç yapı üzerinde çekme testleri uygulamışlardır. Test numunelerinde ise düşük, orta ve yüksek yoğunluklu olmak üzere üç farklı ABS çekirdek yapısı kullanılmıştır.

Yapılan çekme testi sonuçlarına göre ABS numunelerinin üstüne ve altına üç kat CFRP eklenmesi, ortalama kopma dayanımını 9.23 ± 0.34 MPa'dan 93.3 ± 1.5 MPa'ya yükseltirken, elastik modül 0.63 ± 0.1 GPa'dan 10.13 ± 0.1 GPa'ya yükselmiştir. Orta ve yüksek yoğunluklu çekirdek numunelerinde de benzer sonuçlar elde edildi. Üç CFRP tabakalı orta yoğunluklu çekirdek numuneleri için en yüksek mukavemet ve elastik modül sırasıyla 83.3 ± 1.5 MPa ve 11.2 ± 1.7 GPa olarak elde edilmiştir. Son olarak, üç CFRP tabakalı yüksek yoğunluklu çekirdek numuneleri, sırasıyla 93.2 ± 2.6 MPa ve 10.2 ± 0.52 GPa'lık bir mukavemet ve elastik modül sergilemiştir. Elde edilen sonuçlara göre malzeme dayanımını kanıtlayarak dört motorlu İHA'nın kelepçelerini güçlendirmek için kullanılmıştır. Yekpare ABS baskılı kelepçeler sınırlı kullanımdan sonra bile kırılma ya da gevşeme eğilimi göstermiştir. Ancak yeni önerilen sandviç kompozit malzeme tüm bu srounları ortadan kaldırmıştır [97].

Brischetto vd. (2018) mekanik özellikleri düşürmeden ağırlığı azaltabilecek farklı sandviç kompozit konfigürasyonlarını FDM tekniğini kullanarak üretip üç nokta eğme testlerine tabii tutmuşlardır. Bu çalışmada incelenen sandviç kompozit konfigürasyonları PLA yüz malzemesi – PLA homojen çekirdek, ABS yüz malzemesi – PLA homojen çekirdek, ABS yüz malzemesi – PLA bal peteği çekirdek ve PLA yüz malzemesi – PLA bal peteği çekirdek şeklindedir. Tek bir ekstrüder kullanılarak basılan PLA yüz malzemesi – PLA bal peteği çekirdek konfigürasyonu için 5 numune test edilmiştir ve ortalama 1994 N/mm^2 eğilme modülü ve 48.5 N/mm^2 eğilme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. ABS yüz malzemesine sahip konfigürasyonlarda daha düşük eğilme modülü (1378 N/mm^2 ; 794 N/mm^2) elde edilmiştir [98].

Jiang vd. (2018) uzay araçlarında elektromanyetik dalga absorpsiyonu, hafiflik ve üstün mekanik özellik gereksinimlerini karşılamak için bal peteği yapı ve dirençli ince güçlendirici katmanlardan oluşan metamalzeme üretmişlerdir. Bu metamalzeme üç boyutlu baskı ve serigrafi teknikleri ile üretilmiştir, üretilen malzemeye elektromanyetik absorpsiyon ve basma testleri uygulamışlardır. Basma testi sonuçları, üç boyutlu baskı ile üretilen bal peteği yapının basma dayanımının sadece 254.91 kg/m^3 yoğunlukla 10.7 MPa 'ya ulaşabileceğini ve sırasıyla hacim W_v ve birim kütle başına W_m enerji absorpsiyonunun $4.37 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ ve 17.14 kJ/kg olduğunu ortaya koymuştur [99].

Khosravani vd. (2020) akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve akrilonitril stiren akrilattan (ASA) olmak üzere iki farklı filamentten FDM tekniği ile baskı alınmış üçgen

(kafes benzeri) çekirdek ve bal peteği (altıgen) çekirdeklere ve yüz malzemesi olarak karbonfiber kompozitlere sahip sandviç yapılar üç nokta eğme testine tabii tutmuşlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada asıl amaç termal yaşlandırmanın üç boyutlu yazıcıda bastırılan parçaların performansını nasıl etkilediğini araştırmaktır. Bu amaçla bileşenler üzerinde yükleme ve yaşlanmanın etkilerini anlamak için, yaşlandırılmamış ve yapay olarak yaşlandırılmış numuneler üzerinde bir dizi üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Farklı çekirdek yapılarına sahip orijinal ve yaşlandırılmış numunelerin mekanik davranışları ve yapı hataları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre termal olarak yaşlandırılmış ASA'dan üretilen petek çekirdeği, diğer yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış malzemelere kıyasla en yüksek eğilme modülü ve mukavemetini göstermiştir. Bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler hem ABS hem de ASA filamentlerden üretilen malzemelerde üçgen kafes çekirdekli sandviç kompozit yapılara göre daha yüksek yük taşıma kapasitesi göstermiştir. Bu sonuçlar, hem yaşlandırılmış hem de yaşlandırılmamış üç boyutlu baskılı sandviç yapılar için aynıdır [100].

Sugiyama vd. (2018) farklı çekirdek türlerine sahip (bal peteği, eşkenar dörtgen, dikdörtgen ve dairesel çekirdekli) sandviç yapıları reçine emdirilmiş karbonfiber filamentlerden baskı alabilen üç boyutlu yazıcı ile basarak bu yapıların fonksiyonel özellikleri, şekilsel değerlendirmeleri ve üç nokta eğme testleri açısından değerlendirmişlerdir. Çeşitli çekirdek şekillerine sahip sandviç yapılar üzerinde yapılan üç noktalı eğme testlerinin sonuçları, mekanik özelliklerinin büyük ölçüde çekirdek şekline bağlı olduğunu göstermiştir. Üç nokta eğme testlerinde tüm çekirdek şekilleri için etkin yoğunluk arttıkça maksimum yük ve eğilme modülünün arttığı gözlemlense de en dayanıklı olan çekirdek biçimi eşkenar dörtgen olmuştur. Yapılan araştırmanın bir diğer temel amacı da destek malzemesine ihtiyaç duyulmadan sürekli fiber filamentleri kullanarak istenen çekirdek formlarının üç boyutlu yazıcılarla üretilebilirliğini araştırmak olup elde edilen baskı sonuçları ile sürekli karbon fiber filament kullanan üç boyutlu yazıcılar, istenen dayanım ve sertliği karşılamak amacıyla çekirdek üretmek için kullanılabilir olduğunu kanıtlamışlardır [101].

Zhang vd. (2018) polikaprolakton (PCL) malzemesinden üç boyutlu baskı ile bal peteği yapı üretip bu üretilen yapının basma dayanımı ve enerji absorpsiyonunu incelemişlerdir. Bal peteği yapıların mekanik davranışı, 5 °C, 22 °C ve 40 °C sıcaklıklarında düzlem içi yarı statik basma testleri ile araştırılmıştır. Çalışmanın asıl

amaçlarından biri ise PCL malzemesinin şekil geri kazanım (shape recovery) özelliklerinin incelenmesidir. Buna bağlı olarak basma deformasyonundan sonra şekil geri kazanım oranı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, polimerik bal peteği yapısının basma yükleri altında olağanüstü tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur. Basma yüklerinin kaldırılmasından sonra, numuneler ilk deformasyondan sonra %80'e kadar ve beşinci deformasyondan sonra %70'e kadar eski formuna geri dönmüştür [102].

Brischetto ve Torre (2020), masaüstü tipi bir FDM tekniği ile üretilen PLA bal peteği çekirdek ve yüz malzemelerinden oluşan sandviç yapının üç nokta eğme özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Üç nokta eğme testi sonuçları ile lineer elastik eğilme Young modülü (E_{lin}) ve maksimum eğilme mukavemeti (σ_{max}) değerleri belirlenmiştir. Young modülü (E_{lin}) için ortalama 2172,74 MPa ve maksimum eğilme mukavemeti (σ_{max}) için ortalama 60,6750 MPa değerleri elde edilmiştir [103].

Pathipaka vd. (2020) FDM tekniği kullanılarak PLA filamentten baskı alınan bal peteği yapıya, polietilen köpük çekirdeğe ve cam fiber yüz malzemesine sahip sandviç kompozitleri serbest düşme etkisi ile darbe davranışlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre köpük çekirdeğe sahip sandviç numuneler tüm darbe enerjileri için bal peteği çekirdeğe sahip sandviç numunelerden daha fazla enerjiyi sönmlemiştir [104].

Zaharia vd. (2020) gerçekleştirdikleri çalışmada XZ düzleminde herhangi bir destek olmadan üç farklı çekirdek konfigürasyonuna sahip (bal peteği, elmas hücreli ve oluklu) hafif sandviç yapılar üretip bu malzemeleri basma, çekme ve üç nokta eğme testleri sonuçlarına göre mekanik açıdan değerlendirmişlerdir. Mekanik özellikleri belirledikten sonra, bu tip hafif sandviç yapılar, uygulanabilirlik ve darbe özelliklerini belirlemek için bir uçak kanadının firar kenarı formunda üretilip test edilmiştir. Numuneler PLA/PHA(polihidroksialkanoat) malzemedan üretilmiştir. Elmas hücreli çekirdeğe sahip sandviç kompozitler en yüksek basma ve üç nokta eğme mukavemetini göstermiştir. Oluklu çekirdeğe sahip sandviç kompozit konfigürasyonu ise en yüksek çekme mukavemetini göstermiştir. Önerilen yapıların kullanılşılığını göstermek ve doğrulamak için hücum kenarı formunda üretilen sandviç kompozitlerin darbe testinde en yüksek performansı oluklu çekirdeğe sahip konfigürasyon göstermiştir [105].

Joseph vd. (2021) FDM tekniği ile üretilmiş bal peteği yapıların farklı yükleme oranlarında düzlem içi basma dayanımlarını ölçmeyi ve aynı zamanda farklı

malzemelerin (ABS ve PLA filamentlerden üretilmiş bal peteği yapılar) ve birim hücre boyutlarının basma özellikleri üzerindeki etkilerini gözlemlemeyi hedeflemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda malzemenin, hücre duvarı kalınlığının ve uygulanan yükleme oranlarının yapıların basma özelliklerini büyük ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. PLA yapılarının genel olarak, doğal malzeme özelliklerinden dolayı ABS yapılarından daha dayanıklı olduğu da gözlemlenmiştir. Yapıların hücre duvarı kalınlığı arttıkça kompozitlerin basma kuvveti altındaki akma dayanımı da artmaktadır [106].

Pirouzfard ve Zeinedini (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada FDM ile üretilen bal peteği numuneleri ve bunların sandviç yapı formlarının eğilme yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Bal peteği çekirdeğin hücre duvarı kalınlığının, saf PLA panellerin ve sandviç kompozit yapıların eğilme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca petek çekirdeklerin hücre yönlerinin (yatay veya dikey) eğilme yükü altındaki davranışları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda E cam/epoksi yüz yapılarına sahip sandviç panellerin saf PLA çekirdeğe sahip yapılara göre daha yüksek eğilme momenti sergilediğini göstermiştir. Çekirdek formunun dikeyden yataya değiştirilmesiyle, eğilme mukavemetinin ve soğurulan enerji miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçları literatürdeki mevcut verilerle karşılaştırarak, petek çekirdekli sandviç yapıların bükülme özelliklerinin, çekirdek sisteminin Nomex'ten PLA malzemesine değiştirilmesiyle önemli ölçüde iyileştirildiğini ifade etmişlerdir [107].

de Castro vd. (2021) FDM tekniği ile PLA filamentten üretilmiş düzlem dışı yerleşimdeki bal peteği çekirdeğe, düzlem içi yerleşimdeki bal peteği çekirdeğe ve S-şekilli oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapıların çekme, eğme ve Charpy darbe yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Düzlem dışı petek yapılı ve S-şekilli oluklu paneller benzer mekanik davranış sergilemiştir ve bu yapılar düzlem içi petek çekirdekli panellere kıyasla daha üstün çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe yüklerini daha fazla sönümlendiğini kanıtlamışlardır. Eklemeli imalat ile üretilen sandviç paneller, özellikle hafiflik gerektiğinde ikincil yapısal uygulamalar için kabul edilebilir mekanik özellikler sağladığını belirtmişlerdir. Düzlem dışı yerleşimli bal peteği çekirdekli sandviç yapı 43.23 ± 5.24 MPa değerinde çekme dayanımı gösterirken, S-şekilli oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapı 47.38 ± 5.10 MPa değerinde çekme dayanımı ve düzlem içi yerleşimli bal peteği çekirdekli sandviç yapı ise 16.06 ± 1.81 MPa değerinde bir çekme dayanımı göstermiştir. Benzer şekilde eğilme mukavemetlerine bakılırsa düzlem dışı yerleşimli bal

peteği çekirdekli sandviç yapı 46.32 ± 5.46 MPa değerinde eğilme mukavemeti gösterirken, S- şekilli oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapı 43.44 ± 1.82 MPa değerinde eğilme mukavemeti ve düzlem içi yerleşimli bal peteği çekirdekli sandviç yapı ise 29.81 ± 1.97 MPa değerinde bir eğilme mukavemeti göstermiştir. Düzlem dışı yerleşimli bal peteği çekirdekli sandviç yapı ve S- şekilli oluklu çekirdeğe sahip sandviç yapı, düzlem içi yerleşimli bal peteği çekirdekli sandviç yapıya göre daha fazla darbe enerjisi sönmülemişlerdir [108].

Gohar vd. (2021) FDM tekniği ile üretilen bal peteği sandviç yapılarda yüz/çekirdek malzemesinin mekanik özelliklere etkisini incelemek için kompozit filamentten (PLA + %15 karbonfiber) üretilen yüz malzemesi + ABS bal peteği çekirdek, PLA yüz malzemesi + ABS bal peteği çekirdek, kompozit filamentten üretilmiş yüz malzemesi + TPU (thermoplastic polyurethane) bal peteği çekirdek ve PLA yüz malzemesi + TPU bal peteği çekirdek numunelerini üreterek eğme, basma ve arayüzlerin bağlanma mukavemetini test etmişlerdir. Yüz malzemesine ait geometrik özelliklerin etkisini ölçmek için üretim esnasında yazıcının tarama açıları $0^\circ/90^\circ$ ve $45^\circ/-45^\circ$ olmak üzere iki farklı şekilde ayarlanmıştır. Mekanik karakterizasyon, en uygun malzeme konfigürasyonunun $0^\circ/90^\circ$ tarama açıları ile kompozit filamentten üretilmiş yüz malzemeleri ile ABS bal peteği çekirdek olduğunu göstermiştir [109].

3.2. Polimerik Köpük Dolgulu Bal Peteği Sandviç Yapılar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Literatürde ince hücre duvarlı bal peteği yapıların enerji emilimini ve mekanik dayanımını artırmak için yapılan çalışmalar karbonfiber tüpler, polistiren kapalı hücreler, alüminyum köpükler, metalik tüpler ve polimerik köpükler gibi düşük yoğunluklu dolgu malzemelerinin kullanımının önemine dikkat çekmektedir. Tez çalışması kapsamında poliüretan köpük dolgusu kullanıldığı için literatür taramasının bu kısmında polimerik köpük dolgusu ile gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiştir.

Mozafari vd. (2015), alüminyum bal peteği çekirdeklerde poliüretan köpük dolgusunun düzlem içi basma yükleri altındaki etkilerini araştırmışlardır. Köpüklerin yoğunluğunun basma dayanımı üzerindeki etkilerini gözlemlemek adına 65, 90 ve 145 kg/m³ yoğunluklardaki üç farklı poliüretan köpükler kullanılmış ve yarı statik basma testleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum bal peteği çekirdeğe yapılan köpük dolgusunun düzlem içi mekanik özellikler (ortalama ezilme mukavemeti, emilen enerji ve özgül

emilen enerji gibi) üzerindeki etkileri deneysel ve nümerik olarak (sonlu eleman analizi) analiz edilmiştir. Sonuçlar, bal peteği çekirdeğin köpük dolgusunun düzlem içi ezilme mukavemetini 208 kata kadar ve özgül emilen enerjisini 20 kata kadar artırabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, daha ağır bal peteği yapılarda köpük dolgu etkisinin azaldığı ve düzlem içi ezilme mukavemetini 36, özgül enerji emilimini ise 6 kata kadar artırabildiği bulunmuştur. Bal peteği çekirdeğinin poliüretan köpük dolgusunun deformasyon modeli üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır, ancak dolgulu çekirdeklerde köpük dolgusu petek hücrelerinin yerel yoğunlaşmalarını azaltmıştır [110].

Mozafari vd. (2016), 2015 yılında gerçekleştirdikleri çalışmanın devamında üç farklı yoğunluğa sahip poliüretan köpük (65, 90 ve 145 kg/m³) dolgulu alüminyum bal peteği çekirdekli yapıyı düzlem içi düşük hızlı darbe yükleri altında sonlu eleman analizi ile incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde köpük dolgulu sandviç yapılarda meydana gelen deformasyonlar, içi boş bal peteği yapılarda meydana gelen deformasyonlardan önemli ölçüde daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Çarpışma dayanımı analizine göre, alüminyum bal peteği çekirdeğin köpükle doldurulması, her durumda özgül emilen enerjiyi artırırken, pik sıkıştırma kuvveti (Peak Compression Force - PCF) değerlerinin düşmesine neden olmuştur [111].

Liu vd. (2017), alüminyum bal peteği çekirdek yapısına geleneksel poliüretan köpükler yerine genleşmiş polipropilen (EPP – expanded polypropylene) dolgusunun düzlem dışı (eksenel) ve düzlem içi (yanal) basma yükleri altındaki etkilerini incelemişlerdir. Köpük yoğunluğunun etkilerini de gözlemleyebilmek adına 20, 40 ve 60 kg/m³ yoğunluklarındaki üç farklı köpük dolgusu uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar içi boş alüminyum bal peteği yapılarla karşılaştırıldığında EPP köpük dolgulu paneller, düzlem dışı basma yükleri altında ortalama ezilme mukavemetini %34,791 – 120,219, enerji emilimini %46,765 - %179,474 ve düzlem içi basma yükleri altında ise ortalama ezilme mukavemetini %1320 - 4567 ve enerji emilimini 15450 - %30397 arttırmıştır. Köpük dolgulu bal peteği yapı, düzlem dışı basma yüklerinde önemli bir etki yaratmamıştır yalnızca lokal yoğunlaşmayı azaltarak daha düzenli bir formda deforme olmasını sağlamıştır. Köpük yoğunluğunun, yük taşıma ve enerji emme kapasiteleri üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Köpük yoğunluğundaki artış, düzlem içi basma yüklerinde emilen enerjide ve özgül enerji absorpsiyonunda (specific energy absorption - SEA) artışı sağlamıştır. Doldurulan tüm bal peteği yapılar, dolgusuz bal peteği yapıları

ve sadece EPP köpük çekirdeğinin ayrı ayrı toplamından daha yüksek enerji absorpsiyonu sergilemiştir [112].

Roudbenh vd. (2018), gerçekleştirdikleri çalışmada alüminyum bal peteği yapılar üzerinde dolgusuz ve farklı yoğunluktaki üç farklı poliüretan köpük dolgusu yapılmış bal peteği panelleri yüksek hızlı darbe testi altında incelemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan balistik çarpma deneyi ile dolgusuz ve köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç yapılarda balistik sınır hızı, imha şekli, balistik sınır enerji emilimi ve spesifik emilen enerji gibi değerler elde edilmiştir. Köpük dolgulu bal peteği yapıların enerji absorpsiyonunu inceleyerek, absorbe ettikleri enerjinin yalnızca köpük ya da ince hücre duvarlı bal peteği yapıların toplamından daha fazla olduğu bulunmuştur. Alüminyum yüzeyler ile bal peteği çekirdek arasındaki etkileşim etkisi, bu önemli artışın ana nedeni olarak kabul etmişlerdir. Köpük dolgulu sandviç paneller tarafından emilen enerji, köpük yoğunluğunun arttırılmasıyla artmıştır. Bu nedenle üç farklı köpükten en yoğun olan köpük türü ile doldurulan sandviç paneller darbe enerjisini en fazla emen yapı formu olmuştur [113].

Jayaram vd. (2019), köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç panellerde polyester pim ile güçlendirme uygulamasının basma ve düşük hızlı darbe yükleri altında davranışlarını incelemişlerdir. Köpük dolgulu çekirdeği güçlendirmek için 2 ve 3 mm'lik iki farklı çapta pim kullanılmıştır. Köpük dolgulu petek çekirdekli sandviç yapılara eklenen polyester pim takviyesi, basma ve düşük hızlı darbe özelliklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Daha kalın olan pim, daha ince olan pimplere göre incelenen mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlamıştır. Farklı darbe enerjileri altında yük taşıma yetenekleri, enerji emilimi, hasar özellikleri ve hasar mekanizmasının karşılaştırılması, pim takviyeli köpük dolgulu bal peteği çekirdekli panellerin, pimsiz köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip panellerden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir [114].

Zhang vd. (2019), alüminyum bal peteği çekirdek yapısına geleneksel poliüretan köpükler yerine genleşmiş polipropilen (EPP – expanded polypropylene) dolgusunun dinamik darbe yükleri altındaki davranışını incelemişlerdir. Köpük yoğunluğunun etkilerini de gözlemleyebilmek adına 20, 40 ve 60 kg/m³ yoğunluklarındaki üç farklı köpük dolgusu uygulamışlardır. EPP köpük dolgusu numunelerin darbe testinin sıkıştırıcı etkilerini azaltmıştır. Aynı darbe hızı altındaki içi boşluklu bal peteği yapı ile karşılaştırıldığında ortalama mukavemet %15 - %72,5 oranında artmıştır. Statik basma

testindeki özelliklerle karşılaştırıldığında, dinamik darbe testindeki ilk pik kuvveti %1,72-12,04 artarken, ortalama mukavemet %6,51 – %18,84 ve SEA değerleri %31,50 – 65,50 oranında azalmıştır [115].

Roudbenh vd. (2020), alüminyum bal peteği yapıyı dolgusuz ve poliüretan köpük dolgusu ile LS-DYNA sonlu eleman analizi programında modelleyip yüksek hızlı darbe testi analizi gerçekleştirmişlerdir. Tüm numuneler için hasar süreci, köpüğün balistik sınır hız, emilen enerji ve spesifik enerji absorpsiyonu (SEA) üzerindeki etkisi gösterilmiş ve literatürde yer alan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üç farklı tip yoğunlukta köpükle doldurulmuş sandviç panellerin nümerik balistik sınır hızı, dolgusuz bal peteği çekirdekli sandviç panelden daha fazlaydı. Ayrıca nümerik sonuçlar, en yüksek yoğunluklu köpük dolgusunun sandviç panelin mukavemetini artırabileceğini ve bu yapının sayısal özgül enerji absorpsiyonunun dolgusuz çekirdeğe göre %23 daha fazla olduğunu göstermiştir [116].

Yan vd. (2020), PLA filament kullanarak FDM tekniği ile üretilmiş bal peteği yapıları polimetakrilamid (PMI) köpük ile doldurarak düzlem içi – düzlem dışı basma yükleri altında üretilen yapının mekanik performansını hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Parçanın uzunluğu yönünde yapılan düzlem içi basma testine göre elastik modül %296,34, basma dayanımı %168,75, birim hacim başına enerji absorpsiyonu %505,57 ve birim kütle başına enerji absorpsiyonu %244,22 artmıştır. Parçanın genişliği yönünde ise elastik modül %211,65, basma dayanımı %179,85, birim hacim başına enerji absorpsiyonu %799,45 ve birim kütle başına enerji absorpsiyonu %413,02 artmıştır. Düzlem dışı basma altında köpük dolgulu petek için, sıkıştırma mukavemeti %23,5 artmıştır, ancak elastik modül ve enerji emme özelliğinde hemen hemen hiçbir gelişme olmamıştır [117].

Mohamadi vd. (2021), alüminyum bal peteği yapıların üç farklı varyasyonunu (içi boş bal peteği yapı, saf poliüretan elastomer dolgulu yapı ve cam mikrobalon katkılı poliüretan elastomer dolgulu yapı) yarı-statik basma ve düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Yarı statik basma testinde, bal peteği hücrelere elastomer takviyesinin enerji absorpsiyonunun arttırılması üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve enerji absorpsiyonunu yalnızca %20 oranında arttırdığını bulmuşlardır. Elastomerlere cam mikro balon parçacıklarının eklenmesi, yapının ağırlığını azaltmış ve enerji emilimini arttırmıştır. İçi boş bal peteği yapı darbe yükü altında iken tüm yapı yüksekliği boyunca

bükülmüştür. İçi dolgulu numuneler ise aynı miktarda darbe enerjisine maruzken çok daha küçük deformasyonlar meydana gelmiştir [118].

Safarabadi vd. (2021), Nomex bal peteği çekirdekli ve cam-epoksi yüz malzemelerine sahip sandviç kompoziti hem dolgusuz hem de poliüretan köpük dolgulu çekirdek yapılarında burkulma davranışı hem deneysel olarak hem de sayısal modellerle incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada sandviç panellerin viskoelastik özellikleri de dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında dört farklı sandviç kompozitin burkulma davranışı, kritik burkulma yükü ve enerji absorpsiyonu incelenmiştir. Bu dört farklı sandviç kompozit formları tek yönlü yüz malzemesi yerleşimleri [0 0 0 ya da 90 90 90 konfigürasyonu] ile dolgusuz ve poliüretan köpük dolgulu çekirdek malzemelerinden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar, poliüretan köpüğün varlığının, yük fiber yönünde iken kritik burkulma yükünü %14 arttırdığını göstermektedir. Yük fiberlere dik durumunda iken, poliüretan köpük kritik burkulma yükünü %73 arttırmıştır. Standart çekirdek hücre boyutu ve 5 mm çekirdek kalınlığına sahip [0 0 0] yüz levha kompozit yerleşimli poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapı enerji absorpsiyonu ve yük kapasitesi açısından en iyi performansı sergilemiştir [119].

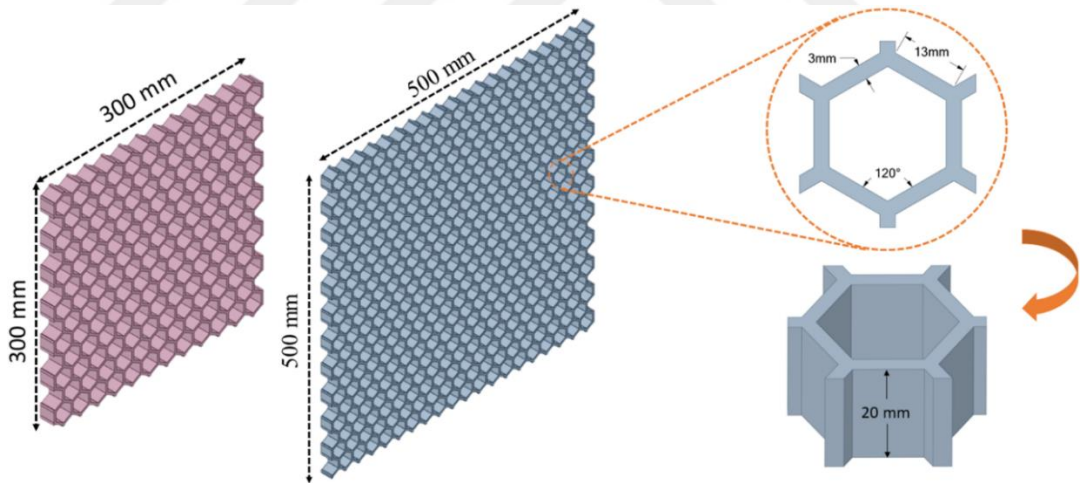
Jayaram vd. (2022), 2019 yılında gerçekleştirdikleri köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç panellerde polyester pim ile güçlendirme uygulamasının basma ve düşük hızlı darbe yükleri altında davranışlarını inceledikleri çalışmanın ardından aynı malzemenin darbe yükü sonrası basma yükü altındaki (Compression After Impact - CAI) davranışlarını incelemişler ve darbe hasar alanını MATLAB programında görüntü işleme tekniklerini kullanarak hesaplamışlardır. Köpük dolgusuna polyester pimlerin ilavesi darbe yükü sonrasında yapılan basma yükü altındaki dayanımı önemli oranda iyileştirmiştir. Yapılan polyester pim takviyesi, yüzey ile çekirdek arasındaki ara yüzey mukavemetini artırarak, düzlem içi basma yükü altında tabakalar arası yüksek kırılma tokluğunu desteklemiştir [120].

4. MATERYAL VE METOD

Çalışma kapsamında üretilen sandviç kompozitin çekirdeği FDM tekniği kullanılarak PLA filamentten üretilmiştir, üretilen bal peteği çekirdek daha sonrasında poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Çekirdek nihai formunu aldıktan sonra karbonfiber yüz malzemesi ile vakum infüzyon tekniği kullanılarak bu malzemeler çekirdek malzeme ile birleştirilmiştir. Bu kısımda sırasıyla önerilen malzemeyi meydana getiren bileşenlerin üretim adımlarından ve üretim sonrası gerçekleştirilen mekanik test çalışmalarından bahsedilecektir.

4.1. Bal Peteği Çekirdeklerin Tasarımı

Üretilmesi planlanan bal peteği yapılar CATIA V5R21 bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı aracılığıyla tasarlanmıştır. Gerçekleştirilecek mekanik testler için yeteri kadar numune çıkarabilmek adına $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$ ve $30 \times 30 \times 2 \text{ cm}^3$ boyutlarında bal peteği yapılar tasarlanmıştır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere bal peteği yapıların bir hücresinin kenar uzunluğu 13 mm olup hücre duvarı kalınlığı ise 3 mm olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bal peteği yapılar düzgün altıgen formunda olup iç açıları 120° ’dir.



Şekil 4.1. CATIA V5R21 programında tasarlanan bal peteği yapılar ve geometrik özellikleri

4.2. Üç Boyutlu Yazıcı ile Bal Peteği Çekirdeklerin Üretimi

FDM tekniği ile bal peteği yapıların üretimi için 1,75 mm çapında PLA filament ve masa üstü tipi üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Daha yüksek çözünürlüklü, daha iyi mekanik ve termal özelliğe sahip ürünlerin basılmasına imkan sağlayabilecek bir filament ile üretim gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PLA filamentin özellikleri Tablo 4.1’de yer almaktadır.

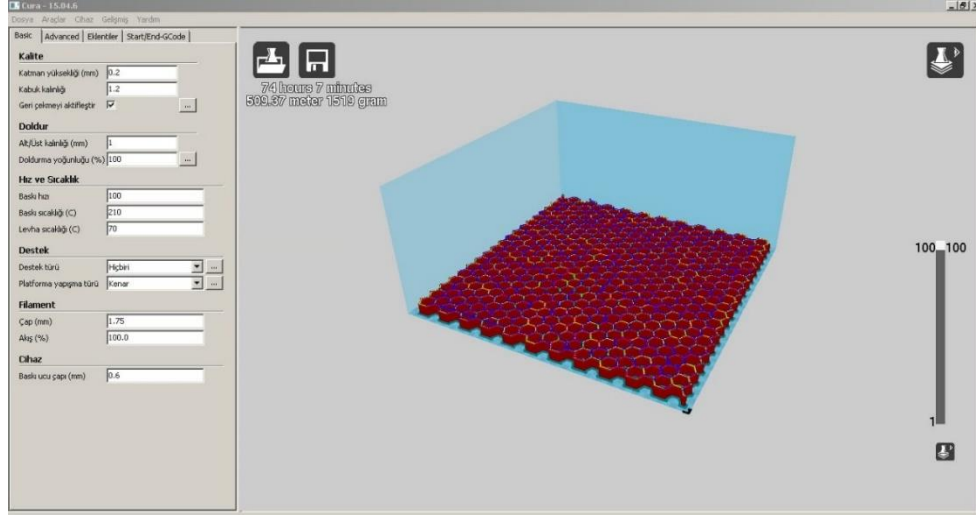
Tablo 4.1. Üretim esnasında kullanılan PLA filamentin özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Öz kütle	1,23 g/cm ³
Eriyik Akış İndeksi	17,3 g/dk
Mekanik Özellikler	
Çekme Mukavemeti	56 MPa
Elastik Modül	2850 MPa
Kopma Uzaması	%7
Çentikli Darbe Testi	14,2 kJ/m ²
Termal Özellikler	
Isı Altında Eğilme Sıcaklığı	55 °C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	55-60 °C

Üretim parametreleri üretim kalitesini ve dolayısıyla mekanik özellikleri etkileyeceğinden dikkatli seçilmesi önem arz etmektedir. Nozul sıcaklığı parametresi PLA filamentin temin edildiği firmanın önerilerine göre belirlenmiştir. Üretime ait katman kalınlığı değeri nozul çapı gözetilerek 0,2 mm olarak belirlenmiştir. Baskı hızı değeri ise üç boyutlu yazıcının özelliklerine göre belirlenmiştir Üretimi gerçekleştirmek için ayarlanan diğer parametreler ve parametre değerleri Tablo 4.2’de ve üretim öncesi Cura yazılımından yapıya ait alınan görüntü Şekil 4.2’de yer almaktadır.

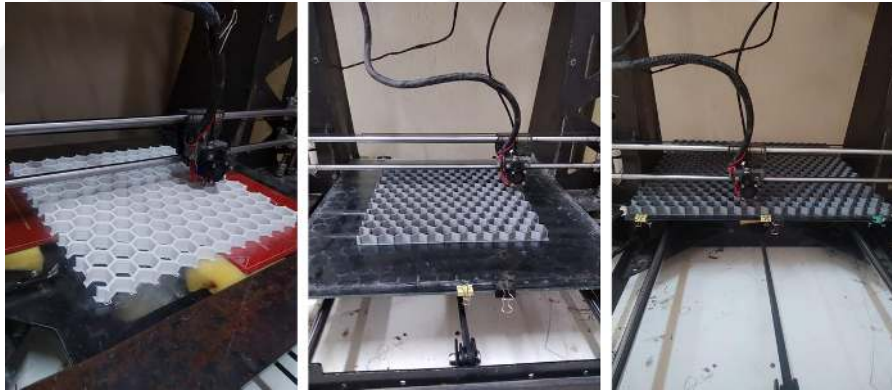
Tablo 4.2. Bal peteği yapıların üretimi için ayarlanan parametreler

Parametreler	Değerler
Katman Yüksekliği	0,2 mm
Başlangıçtaki Katman Kalınlığı	0,3 mm
Nozul Sıcaklığı	210 °C
Baskı Hızı	200 mm/s
Nozul Çapı	0,6 mm
Tarama açısı	±45°
Soğutucu Fan	%0 - %100

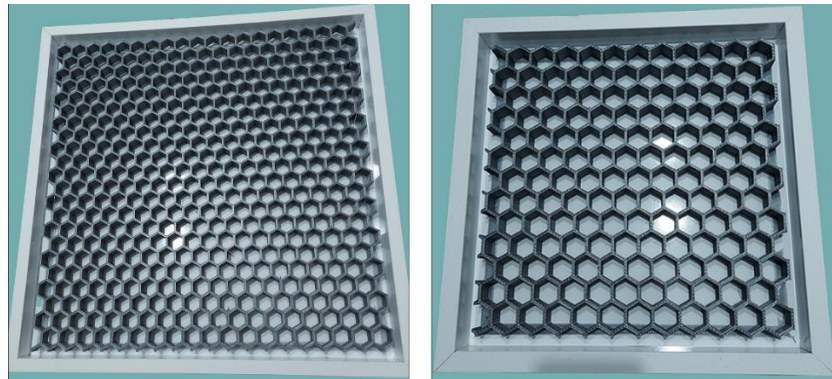


Şekil 4.2. Üretim öncesi Cura programından alınan ekran görüntüsü

CATIA V5R21 programında tasarlanan ve Cura yazılımında dilimlenip g-kodu üretilen bal peteği yapılar üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Kullanılan üç boyutlu yazıcı, üretim esnasındaki ve üretim sonrasındaki yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 4.3 ve 4.4'te yer almaktadır.



Şekil 4.3. Üç boyutlu yazıcının bal peteği yapıları üretim esnasındaki görüntüleri



Şekil 4.4. Baskı sonrası elde edilen bal peteği yapılar

4.3. Bal Peteği Çekirdek Yapıların Poliüretan Köpük ile Doldurulması

Poliüretan köpük üretimi bal peteği yapının içinde gerçekleştirileceğinden ve FDM baskılı petek yapı ile poliüretan köpük arasında herhangi bir yapıştırma malzemesi kullanılmayacağından dolayı farklı yüzeylerde yüksek yapışma mukavemeti ve yüksek basma mukavemeti sağlayacak bir köpük bileşimi seçilmiştir. Poliüretan köpük üretiminde kullanılan poliol ve izosiyanata ait fiziksel karakteristikler ve üretim özellikleri Tablo 4.3 ve 4.4'te yer almaktadır.

Tablo 4.3. Poliüretan köpük üretiminde kullanılan poliol ve izosiyanatın fiziksel özellikleri

Parametre (25°C'de)	Poliol	İzosiyanat
Viskozite (cP)	200 - 500	200 - 250
Yoğunluk (kg/m ³)	0,98 – 1,10	1,20 – 1,25

Tablo 4.4. Poliüretan köpük üretimi için reaksiyon özellikleri

Parametre	Reaksiyon Profili
Ağırlıkça Oran (Poliol/İzosiyanat)	100/120
Kremleşme Zamanı (s)	24 - 28
Jelleşme Zamanı (s)	95 - 120
Yapışma Başlangıç Zamanı (s)	160 - 180
Serbest Yoğunluk (kg/m ³)	34
Kalıplama Yoğunluğu (kg/m ³)	60

İçi doldurulacak bal peteği yapılar 50×50×2 cm³ ve 30×30×2 cm³ boyutlarında olup içi boşluklu olduğundan dolayı dolgu kısmı için gerekli olan köpük hacmi toplam hacimden bal peteği yapının hacmi çıkarılarak elde edilmiştir. Elde edilen hacim değerleri için gerekli poliol ve izosiyanat miktarları Denklem 4.1 ve 4.2'de görüldüğü üzere kalıplama yoğunluğu değeri kullanılarak elde edilmiştir.

$$Doldurulacak\ hacim = Düz\ plaka\ hacmi - Boşluklu\ bal\ peteği\ yapı\ hacmi \quad (4.1)$$

$$Kalıplama\ Yoğunluğu = \frac{Kütle}{Doldurulacak\ Hacim} \quad (4.2)$$

Aşağıda yer alan Denklem 4.3 ve 4.4'te $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$ boyutundaki yapıyı temsilen hesaplamalarda 50 indisi ve $30 \times 30 \times 2 \text{ cm}^3$ boyutundaki yapıyı temsilen ise 30 indisi kullanılmıştır.

$$V_{50} = 5000 - 1122,7 = 3877,3 \text{ cm}^3 \cong 0,0039 \text{ m}^3$$

$$d_{50} = \frac{m_{50}}{V_{50}} \rightarrow 60 \text{ kg/m}^3 = \frac{m_{50}}{0,0039 \text{ m}^3} \rightarrow m_{50} = 0,234 \text{ kg} = 234 \text{ g} \quad (4.3)$$

$$V_{30} = 1800 - 420,47 = 1379,53 \text{ cm}^3 \cong 0,0014 \text{ m}^3$$

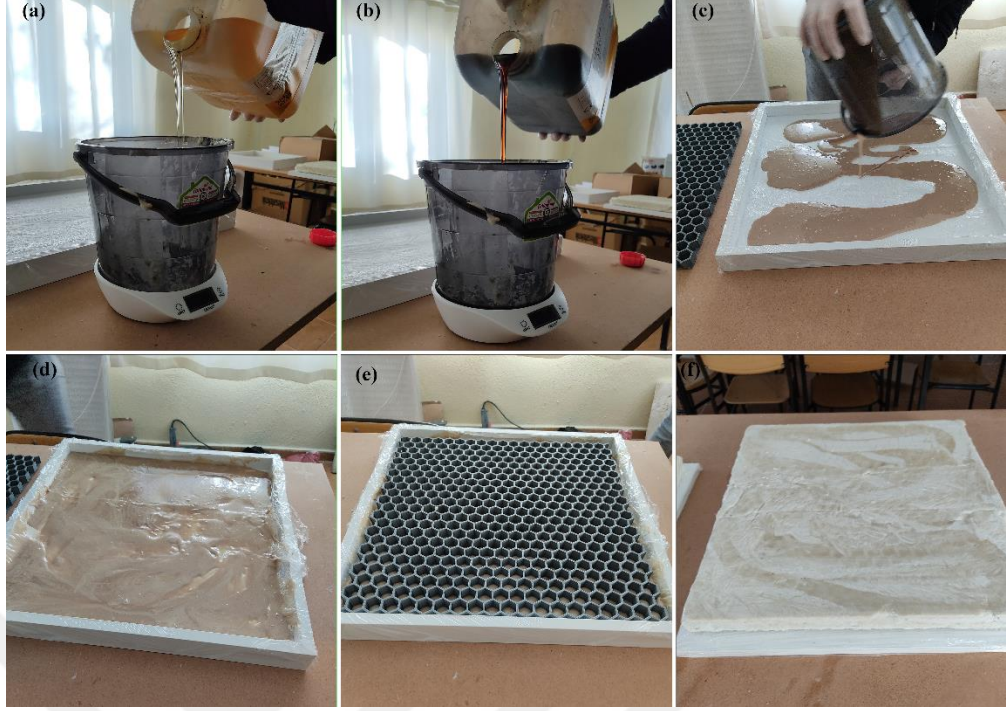
$$d_{30} = \frac{m_{30}}{V_{30}} \rightarrow 60 \text{ kg/m}^3 = \frac{m_{30}}{0,0014 \text{ m}^3} \rightarrow m_{30} = 0,084 \text{ kg} = 84 \text{ g} \quad (4.4)$$

Elde edilen kütle değerleri, sırasıyla poliol ve izosiyanat için belirtilen ağırlıkça oran ifadesi kullanılarak 1/1,2 oranında bileşenlerine ayrılmıştır ve kullanılması gereken poliol ve izosiyanat bileşenlerinin miktarları hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen poliol ve izosiyanat bileşenleri şu şekildedir;

$$m_{poliol_{50}} \cong 107 \text{ g ve } m_{izosiyanat_{50}} \cong 127 \text{ g} \quad (4.6)$$

$$m_{poliol_{30}} \cong 38 \text{ g ve } m_{izosiyanat_{30}} \cong 46 \text{ g}. \quad (4.7)$$

Üretimin daha düzgün bir formda gerçekleşebilmesi için dolgu yapılacak bal peteği yapı boyutlarında kalıplar kullanılmıştır. Yukarıda hesaplanan bileşenler hassas tartı ile tartılmış ve karıştırıldıktan sonra kalıba dökülmüştür. Daha sonrasında kalıba düzgün formda yayılan poliol – izosiyanat karışımı üzerine kremleşme zamanından sonra dolgu yapılacak bal peteği yapı yerleştirilmiştir ve kalıp kapağı kapatılarak üzerine ağırlık uygulanmıştır. Poliüretan köpük dolgusuna ait üretim sürecini içeren görseller Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Poliüretan köpük dolgusu süreci; (a) poliol bileşeninin kütle ölçümü, (b) izosiyanat bileşenlerinin kütle ölçümü, (c) karıştırılan poliol ve izosiyanatın kalıba dökülmesi, (d) kalıba dökülen karışımın kalıba düzgün formda yayılması, (e) doldurulmak istenen yapının karışımın üzerine oturtulması, (f) poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeği

4.4. Poliüretan Köpük Dolgulu Bal Peteği Çekirdeklerin Uygun Forma Getirilmesi

Poliüretan köpüğün köpükleşme esnasında meydana gelen genişlemesinden dolayı üretim esnasında problem olmaması ve bal peteği yapıya zarar vermemesi açısından kalıp yapıları istenen ölçülerden biraz büyük üretilmiştir. Dolayısıyla meydana gelen köpük dolgusu istenen çekirdek boyutunu aşmıştır. İstenen çekirdek boyutunu elde edebilmek ve sandviç kompozit üretimi esnasında yüz malzemeleri ile daha düzgün ve mukavim bir birleşim elde edebilmek adına fazlalık olan köpük yapı zımpara kullanılarak istenen forma getirilmiştir. Şekil 4.6’da zımparalama işlemi ve zımpara sonrası elde edilen yapılar gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Çekirdek yapının istenen forma getirilmesi adına uygulanan zımparalama işlemi

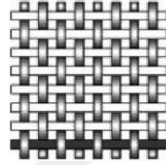
4.5. Sandviç Kompozitin Üretimi

Mekanik açıdan karşılaştırabilme adına içi boşluklu ve içi poliüretan köpük dolgulu yapılar yüz malzemesi olarak karbonfiber kullanılarak epoksi reçine ile birleştirilmiştir. Her iki çekirdek malzemesi için de aynı karbonfiber kumaş ve aynı epoksi reçine sistemi kullanılmıştır. İçi poliüretan köpük dolgulu bal peteği yapıyı karbonfiber yüz malzemeleri ile bir araya getirmek için vakum infüzyon yöntemi kullanılırken içi boşluklu bal peteği yapıyı karbonfiber yüz malzemeleri ile bir araya getirmek için önce el yatırması yöntemi kullanılarak yüz malzemelerine epoksi reçine uygulanmış ve daha sonra vakum altında vakum torbalama yöntemi ile sandviç kompozit haline getirilmiştir. İçi boşluklu bal peteği yapının doğrudan vakum infüzyon yöntemi ile üretilmemesinin sebebi ise vakum infüzyon yönteminde epoksi reçine vakum altında tüm boşlukları doldurarak ilerleyecektir bu durum çekirdek malzemenin içinin boşluklu kalmasını önleyecek ve gerçek mekanik dayanımını yansıtmamasına mani olacaktır. Dolayısıyla bu durumu önlemek adına önce el yatırması daha sonrasında ise vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır.

Karbonfiber kumaşa ait özellikler Tablo 4.5'te yer almaktadır. Sandviç kompozitlerin üretiminde yüz malzemesi olarak karbon ipliklere ek olarak 20 cm aralıklarla dokunan polyester destek ipliklerini de barındıran 284 g/m² plain dokumalı havacılık sektörüne uygun karbonfiber kumaşlar kullanılmıştır. Üretim sıralamasına göre karbonfiber kumaşlar istenen ölçülerde kesilmiş ve vakum infüzyon düzeneği oluşturulmuştur. Üretim sırasında epoksi reçinenin kurlenmesi için sistem 75°C'lik

vakum battaniyesi ile sarılmıştır. Kullanılan epoksi reçine $1,10 \pm 0,05$ kg/lt yoğunluğa sahip ve 25°C 'de 300 ± 50 cP viskoziteye sahip olan havacılık gereksinimlerine uygun (DURATEK® DTE1200 + DTS1151) bir reçinedir. Sandviç kompozit üretiminde kullanılan malzemeler Tablo 4.6'da yer almaktadır.

Tablo 4.5. Sandviç kompozit üretiminde kullanılan karbonfiber kumaşa ait özellikler

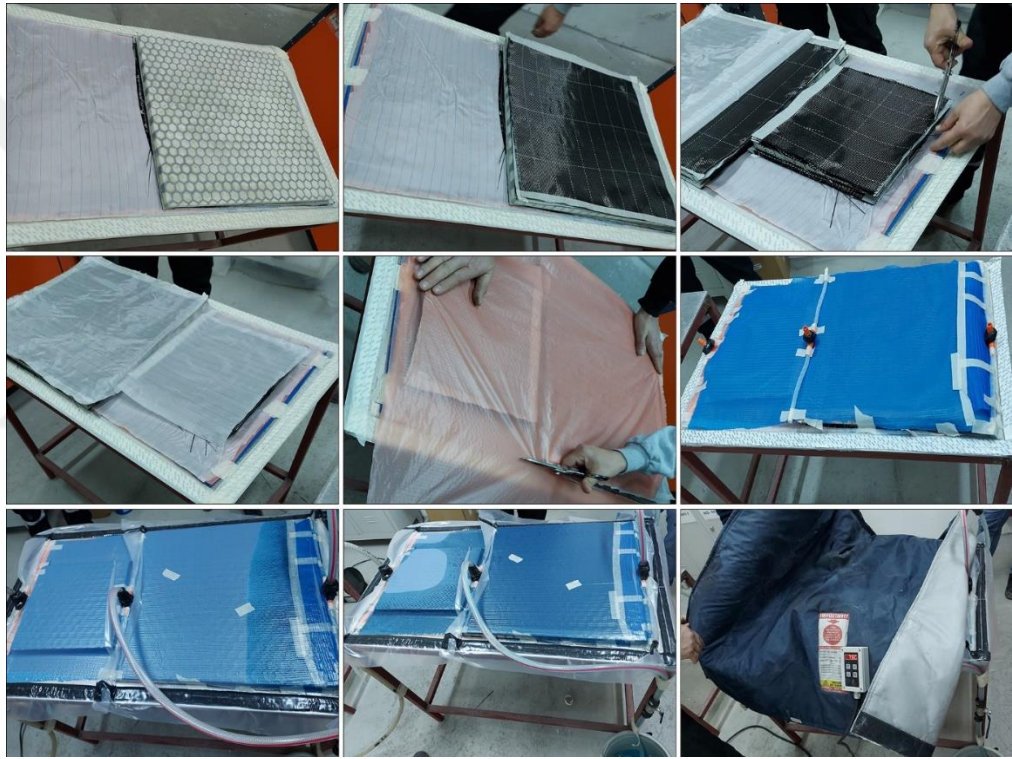
Özellik	Değer
Karbonfiber kumaş dokuma tipi	Plain dokuma
	
Alana bağlı yoğunluk	$284 \text{ g/m}^2 \pm \%5$
Kalınlık	0.25 mm
Çekme Dayanımı	3800 MPa
Çekme Modülü	240 GPa

Tablo 4.6. Sandviç kompozitlerin üretiminde kullanılan yüz malzemesi ve çekirdek malzemeler

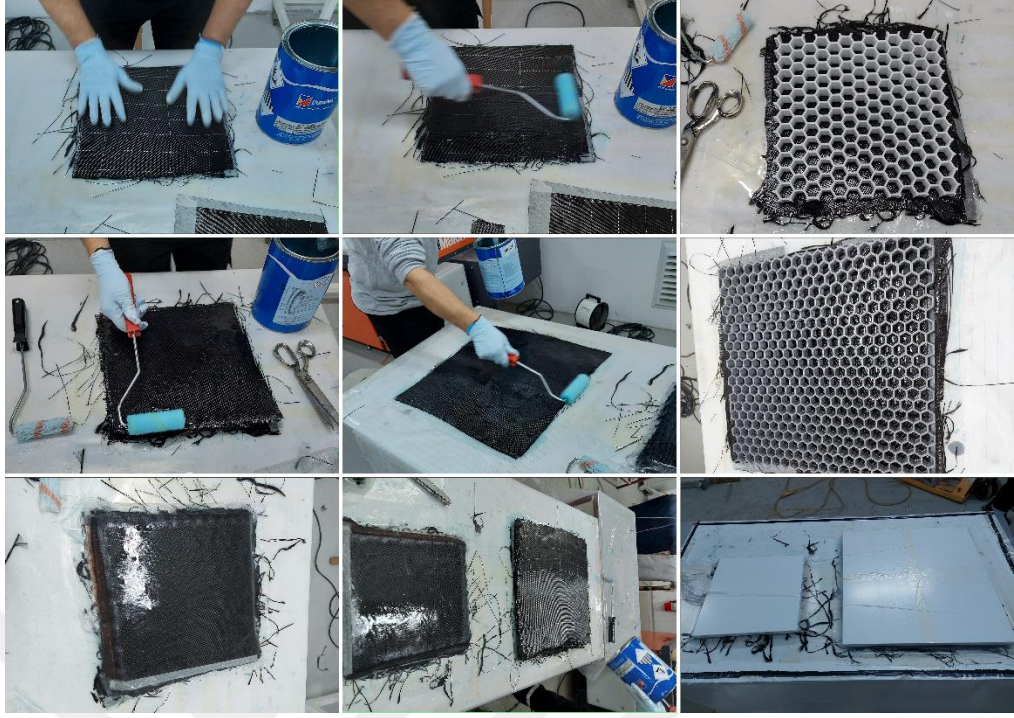
Yüz malzemesi	Reçine	Çekirdek malzemesi	Üretim Yöntemi
Her bir yüzde 4 kat kullanılan plain dokumalı karbon fiber kumaş	Epoksi	İçi boşluklu FDM baskılı bal peteği yapı	El yatırması – vakum torbalama
		İçi poliüretan dolgulu FDM baskılı bal peteği yapı	Vakum infüzyon

Kuru karbon fiber kumaşlar üst üste 0/90 yönelimi ile vakum infüzyon masasına dizilmiştir alt yüz tamamlandıktan sonra çekirdek malzeme ve çekirdeğin üzerine de üst yüz serilmiştir. Vakum infüzyon malzemeleri gereken sıra ile yerleştirilmiştir. FDM tekniği ile üretimi gerçekleştirilen $50 \times 50 \times 2 \text{ cm}^3$ ve $30 \times 30 \times 2 \text{ cm}^3$ boyutlarındaki poliüretan köpük dolgulu bal peteği yapılar aynı vakum sisteminde sandviç kompozit formuna getirileceğinden gerektiğinde reçine beslemesi yapabilmek adına için ikinci bir reçine hattı bağlantısı yapılmıştır. El yatırması – vakum torbalama yönteminde ise karbon

kumaşlara sırasıyla fırça ile epoksi uygulanmıştır ve 0/90 yönelimi ile yerleştirilmiştir. Alt yüz tamamlandığında üzerine çekirdek malzeme ve onun da üzerine yine epoksi reçine uygulanarak üst yüz serilmiştir. Kullanılan çekirdek malzeme olan bal peteği yapının içi boşluklu ve hücre duvarları ince olduğu için el yatırması – vakum torbalama yönteminde ise vakumlama esnasında uygun birleşmeyi sağlayabilmek adına malzemelerin üzerine ağırlık uygulanmıştır. Şekil 4.7’de vakum infüzyon süreci yer almakta ve Şekil 4.8’de ise el yatırması - vakum torbalama tekniği yer almaktadır. Üretimi tamamlanan yapıların karbonfiber kumaşlar ve epoksi reçine ile kalınlık değeri artmış olup 2,5 cm değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.7. Vakum infüzyon ile poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin üretimi



Şekil 4.8. *El yatırması – vakum torbalama yöntemi ile içi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin üretimi*

4.6. Üretilen Sandviç Kompozitlere Uygulanan Testler

Üretilen sandviç kompozitlere mekanik olarak ASTM standartlarına dayalı olarak düzlem içi basma (edgewise compression), üç nokta eğme ve kesme (shear) testi uygulanmıştır. Mekanik testlerin haricinde ASTM standartlarına dayalı olarak çekirdeğin su emilim özelliklerini belirlemek adına su emilim testi gerçekleştirilmiştir. Üretilen sandviç kompozitten standartlar kapsamında istenen boyutlarda numuneler kesilmiştir. Uygulanan test işlemleri laboratuvar ortamında ve 5'er numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanik testler Shimadzu AG-IC marka test cihazında uygulanmıştır. Testler hem köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlere hem de içi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlere uygulanmıştır, elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

4.6.1. Düzlem içi basma testi (edgewise compression)

Düzlem içi basma testi ASTM C364/C364M-16 standardına göre 100 kN'luk yük hücresi kullanılarak 0,5 mm/dk hızda köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlere ve içi boşluklu bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlere uygulanmıştır. Her iki yapı için de 90×90×25 mm³ boyutlarında 5'er adet numune kullanılmıştır. Bu test yönteminde numuneler sandviç yapının yüz kısmının düzlemine

paralel olacak şekilde monoton olarak artan bir basma kuvvetine maruz bırakılır. Uygulanan kuvvet Şekil 4.9’da gösterildiği üzere sabitlenmiş ve kenetlenmiş destekler aracılığıyla yapıya iletilir.



Şekil 4.9. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan numune

4.6.2. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testi ASTM C393/C393M-20 standardına göre 100 kN’luk yük hücresi kullanılarak 1mm/dk hızda köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlere ve içi boşluklu bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlere uygulanmıştır. Her iki yapı için de $200 \times 75 \times 25 \text{ mm}^3$ boyutlarında 5’er adet numune kullanılmıştır ve alt çenelerin açıklığı 114 mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere üç nokta eğme testinde yapı, sandviç yapının düzlemine dik bir eğme momentine maruz bırakılır ve test kapsamında uygulanan kuvvete karşılık sehim değerine ek olarak çekirdek kesme gerilmesi ve yüz malzemesinde meydana gelen gerilme değerleri elde edilir.



Şekil 4.10. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan numune

4.6.3. Kesme (shear) testi

Kesme (shear) testi ASTM C273/C273M-20 standardına göre 2 mm/dk hızda köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlere ve içi boşluklu bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlere uygulanmıştır. Her iki yapı için de $270 \times 75 \times 25 \text{ mm}^3$ boyutlarında 4'er adet numune kullanılmıştır. Şekil 4.11'de gösterildiği üzere bu test yöntemi bir sandviç yapının çekirdeğinin veya sandviç panelin, yüzlerinin düzlemine paralel biçimde monoton olarak artan kesme kuvvetine maruz bırakılması ile gerçekleştirilir. Çekirdek kesme özellikleri, sandviç panellerin tasarımında kullanılan temel özelliklerden biri olduğu için bu test yöntemi, yüz malzemesinin düzlemine paralel kesme kuvveti ile yüklendiğinde sandviç yapıların veya çekirdek yapının kuvvet-sehim davranışı hakkında bilgi sağlamaktadır.



Şekil 4.11. *Kesme testine maruz bırakılan numune*

4.6.4. Su emilim testi

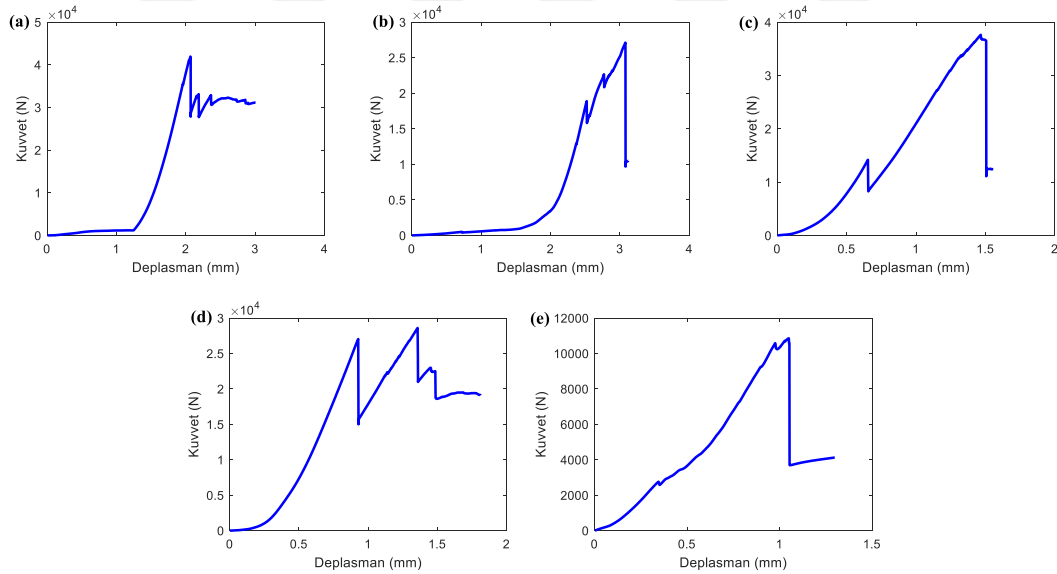
Sandviç kompozitin çekirdek kısmının belirli bir nem koşulunda bırakılması ve sonrasında numunede meydana gelen kütle artışının ölçümü ile emilen su miktarının belirlenmesine dayanan bu testte sandviç kompozit numuneleri 192 saat boyunca nem ortamına maruz bırakılmışlardır. ASTM C272/C272M-18 standardına göre gerçekleştirilen testte $75 \times 75 \times 25 \text{ mm}^3$ boyutunda 5 adet numune kullanılmıştır. Köpük dolgulu çekirdeğe sahip sandviç kompozit ile içi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit yapıların nem emilim özellikleri kıyaslanmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

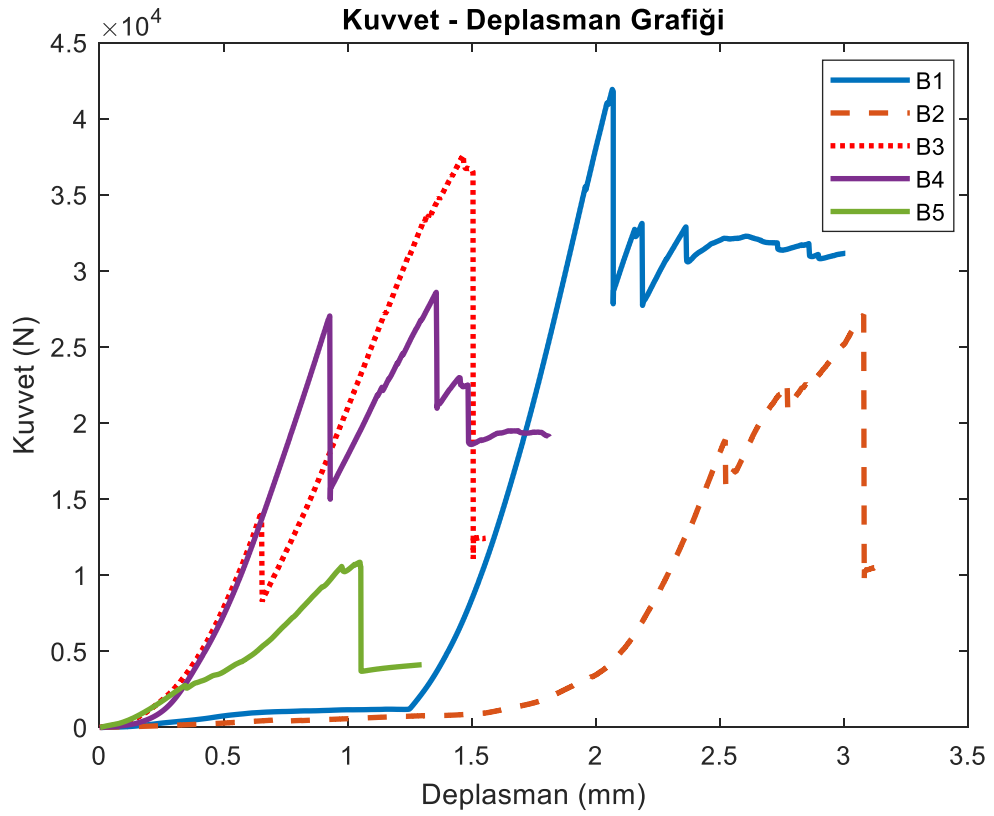
5.1. Düzlem İçi Basma (Edgewise Compression) Testi Sonuçları

5.1.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların düzlem içi basma testi sonuçları

Üretilen sandviç kompozitin düzlem içi basma özellikleri sandviç yapıya paralel bir yönde uygulanan basma yükü altında belirlenmiştir. Bu özelliklere ek olarak sandviç kompozit numunelerde meydana gelen hasar modları tespit edilmiştir. Mekanik test sonuçlarına göre her bir numune için kuvvet – deplasman grafikleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Şekil 5.1 ve 5.2’de görüldüğü üzere tüm numunelerde sandviç yapıda kırılmaların başladığı kuvvet değerlerine ve maksimum kuvvet değerlerine yakın değerlere kadar doğrusal görünen bir eğri sergiledikleri gözlenmektedir. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapıların tüm test numunelerinde hasar modları çekirdek – yüz ayrılması şeklinde meydana gelmiştir. Şekil 5.3’te yer alan çekirdek ve yüz malzemesinin ayrılmasının temel sebebi ise bu iki yüzey arasında meydana gelen kesme kuvveti nedeniyle arayüz bağlarının ayrılmasıdır.



Şekil 5.1. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan içi boşluklu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman grafikleri; (a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi, (e) B5 numunesi



Şekil 5.2. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numunelerinin basma testi için kuvvet - deplasman grafiği

Tablo 5.1’de yer alan verilere göre B1 numunesi diğer numuneler ile kıyaslandığında 41925 N ile en yüksek maksimum kuvvet ve 16,64 MPa değeri ile en yüksek yüzey dayanımı değerlerine ulaşmıştır. B5 numunesi ise 10853,80 N maksimum kuvvet ve 4,39 MPa yüzey dayanımı değerleri sergilemiştir. En yüksek nihai basma dayanımını ise 140,81 MPa ile yine B1 numunesi sergilemiştir. Oldukça düşük mekanik dayanım sergileyen B5 numunesine ait değerler ortalama hesabına dahil edilmemiştir. Tablo 5.1’deki veriler kullanılarak içi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerde ortalama $33812,50 \pm 7126,47$ N’luk bir kuvvet dayanımı, ortalama $124,50 \pm 20,80$ MPa nihai basma dayanımı ve ortalama $13,52 \pm 2,86$ MPa değerinde bir yüzey dayanımı sergilemiştir.

Tablo 5.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitin düzlem içi basma testi sonuçları

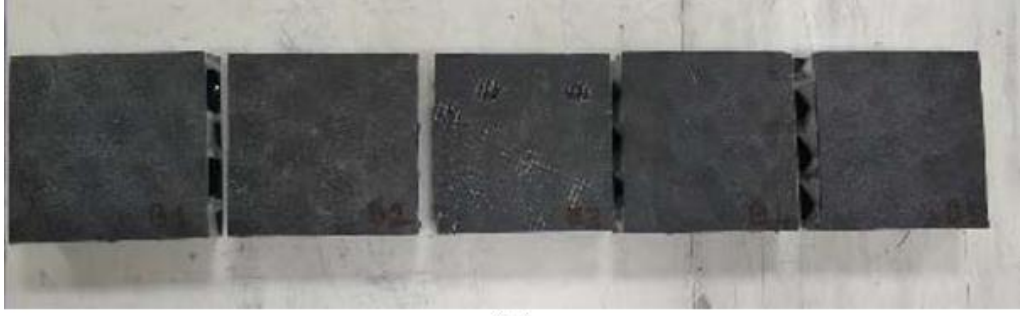
Numune	Maksimum Kuvvet (N)	Yüzey Dayanımı (MPa)	Nihai Basma Dayanımı (MPa)
B1	41925,00	16,64	140,81
B2	27115,60	10,69	94,95
B3	37615,60	15,21	137,06
B4	28593,80	11,54	125,15
B5	10853,80	4,39	37,84
Ortalama	33812,50	13,52	124,50
Standart Sapma ($\pm$)	7126,47	2,86	20,80

Sandviç kompozite ait yüzey dayanımı ($\sigma_{yüz}$) değerleri Denklem 5.1 kullanılarak elde edilmiştir. Denklem 5.1’de yer alan P_{maks} ifadesi hasara sebep olan nihai kuvvet değerini, w numuneye ait genişlik değerini ve t_{toplam} ifadesi ise sandviç kompozitin toplam kalınlığını sembolize etmektedir.

$$\sigma_{yüz} = \frac{P_{maks}}{w t_{toplam}} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{nihai} = \frac{P_{maks}}{w(2t_{fs})} \quad (5.2)$$

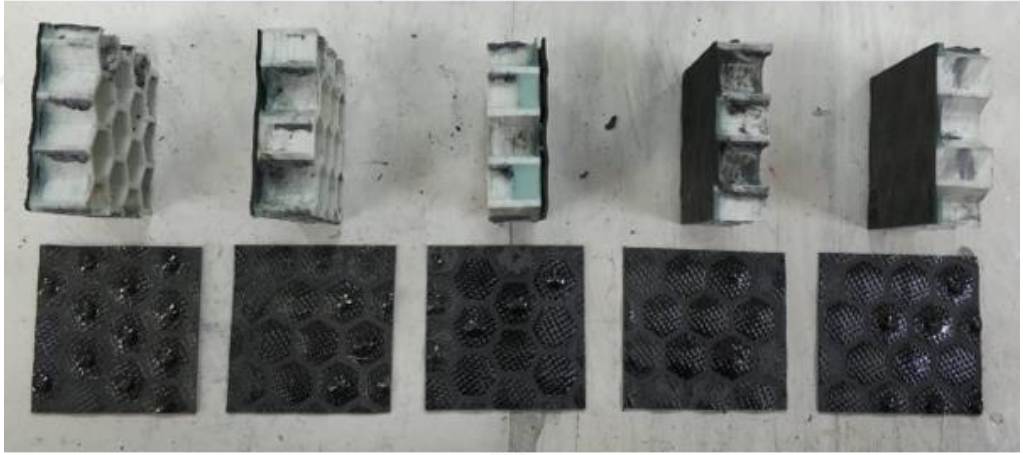
Sandviç kompozitin düzlem içi basma yükü altındaki nihai dayanımı (σ_{nihai}) ise Denklem 5.2 kullanılarak elde edilmiştir. Denklem 5.2’de yer alan P_{maks} ifadesi hasara sebep olan nihai kuvvet değerini, w numuneye ait genişlik değerini ve t_{fs} ifadesi ise tek bir yüz kalınlığını sembolize etmektedir.



(a)



(b)

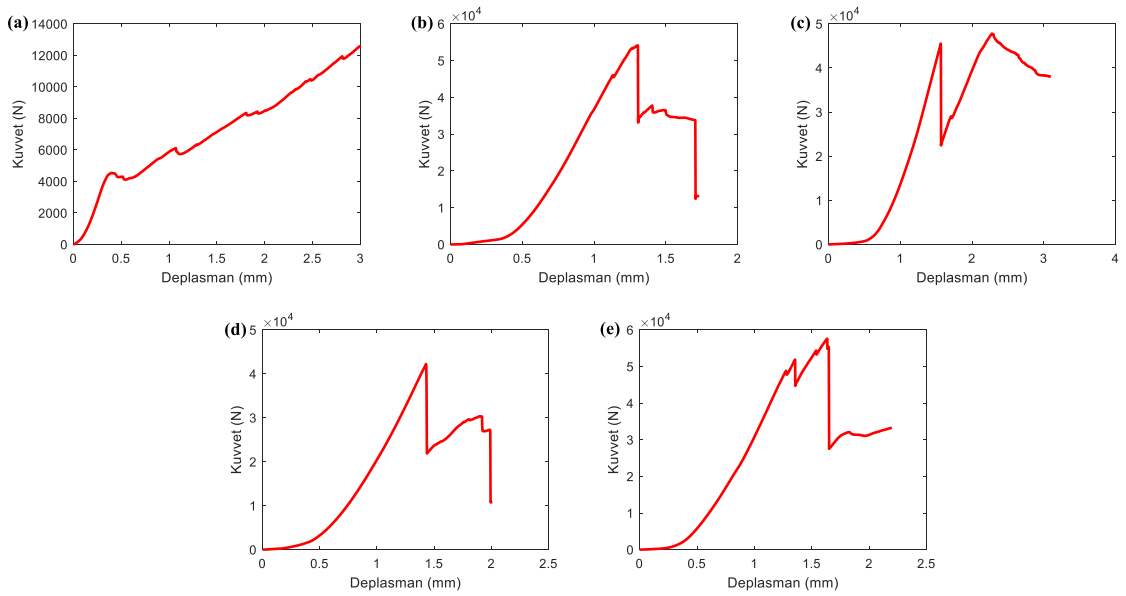


(c)

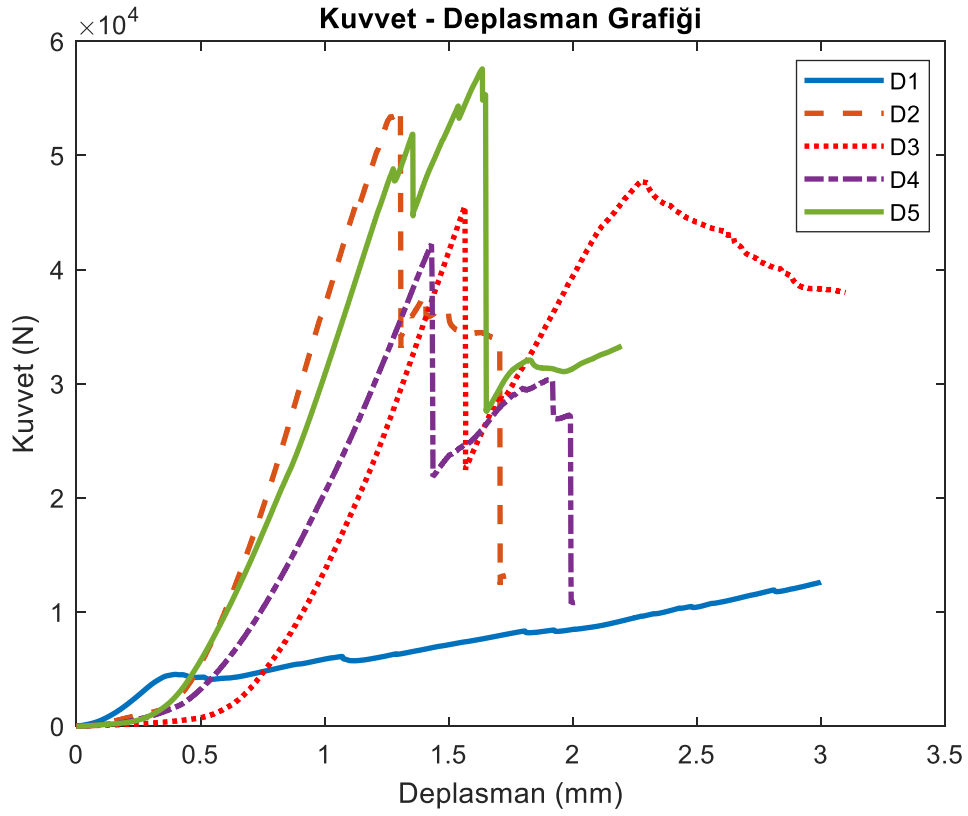
Şekil 5.3. Test öncesi ve sonrası numuneler; (a) test öncesi numunelerin üstten görünüşü, (b) test öncesi numunelerin yandan görünüşü, (c) test sonrası meydana gelen çekirdek - yüz ayrılması hataları

5.1.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların düzlem içi basma testi sonuçları

Üretilen poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitin düzlem içi basma özellikleri sandviç yapıya paralel bir yönde uygulanan basma yükü altında belirlenmiştir. Bu özelliklere ek olarak sandviç kompozit numunelerde meydana gelen hasar modları tespit edilmiştir. Mekanik test sonuçlarına göre her bir numune için kuvvet – deplasman grafikleri Şekil 5.4’te gösterilmektedir. Şekil 5.4 ve 5.5’te görüldüğü üzere tüm numuneler içi boşluklu sandviç çekirdeğe sahip sandviç kompozit gibi sandviç yapıda kırılmaların başladığı kuvvet değerlerine ve maksimum kuvvet değerlerine yakın değerlere kadar doğrusal görünen bir eğri sergiledikleri gözlenmektedir.



Şekil 5.4. Düzlem içi basma testine maruz bırakılan içi poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli numunelerin her birinin basma testine ilişkin kuvvet - deplasman grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi, (e) D5 numunesi

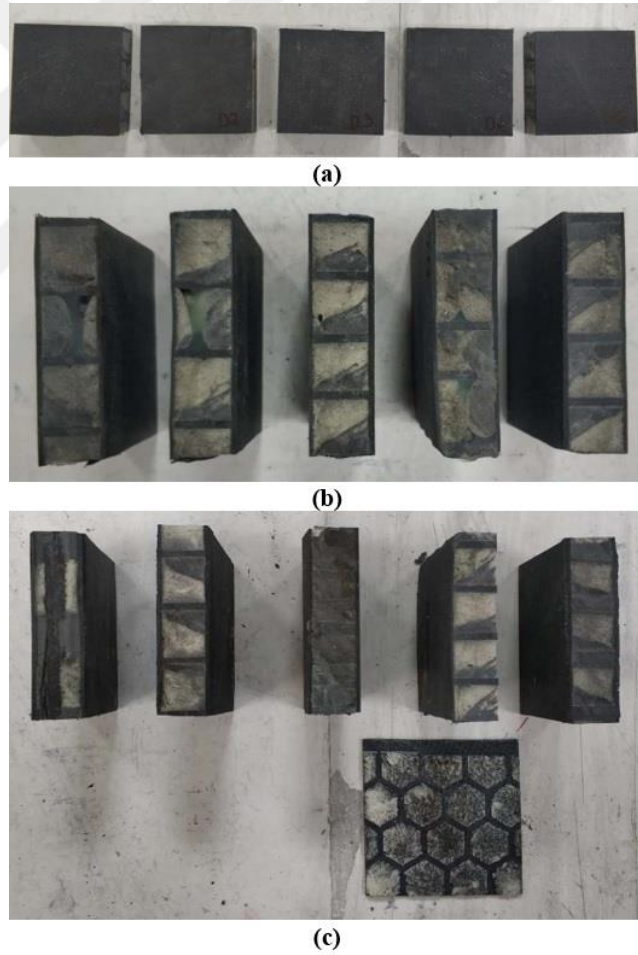


Şekil 5.5. İçi poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği

Tablo 5.2’de yer alan verilere göre D5 numunesi diğer numuneler ile kıyaslandığında 57584,40 N ile en yüksek maksimum kuvvet, 185,04 MPa ile en yüksek nihai basma dayanımı ve 27,36 MPa değeri ile en yüksek yüzey dayanımı değerlerine ulaşmıştır. D1 numunesi ise 12622,50 N maksimum kuvvet, 39,75 MPa nihai basma dayanımı ve 6,02 MPa yüzey dayanımı ile en düşük değerleri sergilemiştir. Oldukça düşük mekanik dayanım sergileyen D1 numunesine ait değerler ortalama hesabına dahil edilmemiştir. Tablo 5.2’deki veriler kullanılarak poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerde ortalama $50432,45 \pm 6816,19$ N’luk bir kuvvet dayanımı, ortalama $147,73 \pm 29,33$ MPa nihai basma dayanımı ve ortalama $23,43 \pm 3,39$ MPa değerinde bir yüzey dayanımı sergilemiştir. Sandviç kompozite ait yüzey dayanımı ($\sigma_{yüz}$) ve sandviç kompozitin düzlem içi basma yükü altındaki nihai dayanımı (σ_{nihai}) Denklem 5.1 ve 5.2 kullanılarak elde edilmiştir. Numunelerin basma testi öncesindeki ve sonrasındaki durumları Şekil 5.6’da gösterilmektedir.

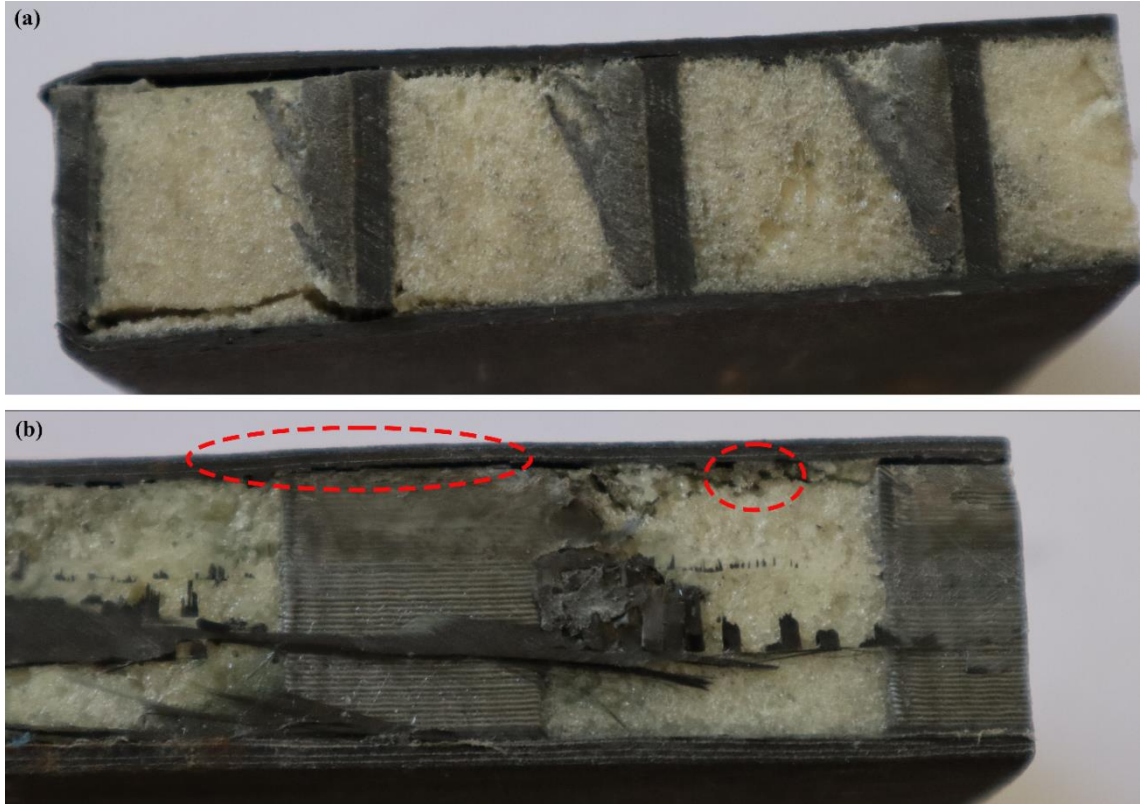
Tablo 5.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitin düzlem içi basma testi sonuçları

Numune	Maksimum Kuvvet (N)	Yüzey Dayanımı (MPa)	Nihai Basma Dayanımı (MPa)
D1	12622,50	6,02	39,75
D2	54137,50	24,88	157,24
D3	47793,80	21,86	123,53
D4	42214,10	19,62	125,11
D5	57584,40	27,36	185,04
Ortalama	50432,45	23,43	147,73
Standart Sapma ($\pm$)	6816,19	3,39	29,33



Şekil 5.6. Test öncesi ve sonrası numuneler; (a) test öncesi numunelerin üstten görünüşü, (b) test öncesi numunelerin yandan görünüşü, (c) test sonrası meydana gelen hatalar

İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapılara ait numunelerin hepsinde çekirdek – yüz malzemesi ayrılması hasarları meydana gelirken, poliüretan köpük dolgulu sandviç kompozitlerde yalnızca bir numunede bu hasar gözlenmiştir. Diğer poliüretan köpük dolgulu numunelerde ise yüz malzemesinin burkulması ve çekirdek ile yüz malzemesi arasında çatlaklar gibi hatalar meydana gelmiştir. Şekil 5.7(a)'da bu hatalardan yüz ve çekirdek malzeme arasında meydana gelen çatlaklar gösterilirken, Şekil 5.7(b)'de ise yüz burkulması ve poliüretan çekirdekte meydana gelen çatlak hasarları gösterilmektedir.



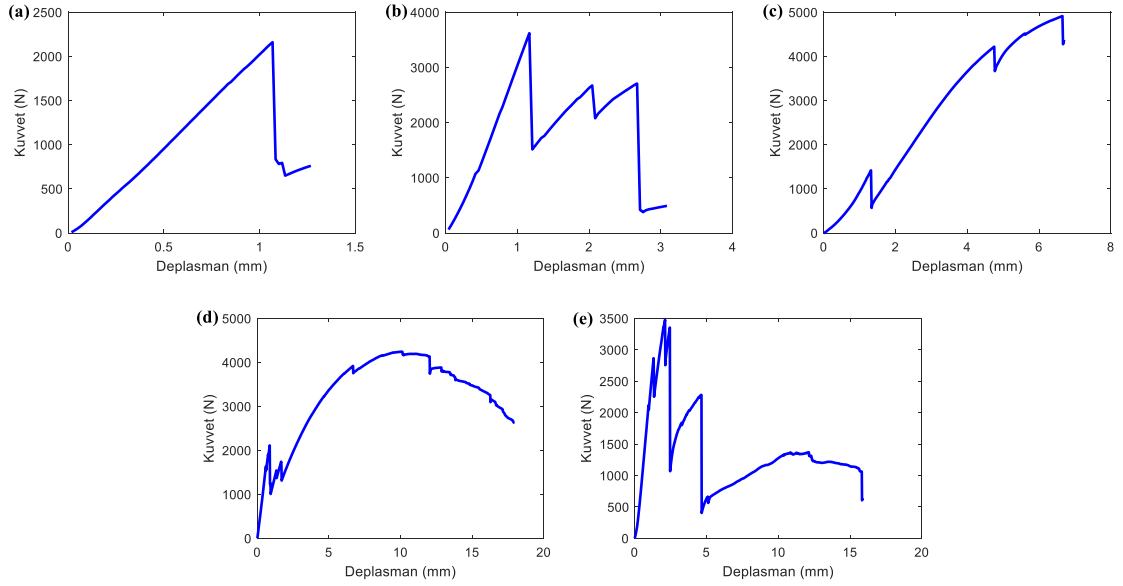
Şekil 5.7. Poliüretan köpük dolgulu sandviç yapıda meydana gelen hatalar; (a) yüz - çekirdek arası çatlaklar, (b) yüz burkulması ve çekirdekte yer alan köpük dolgusunda meydana gelen çatlaklar

5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

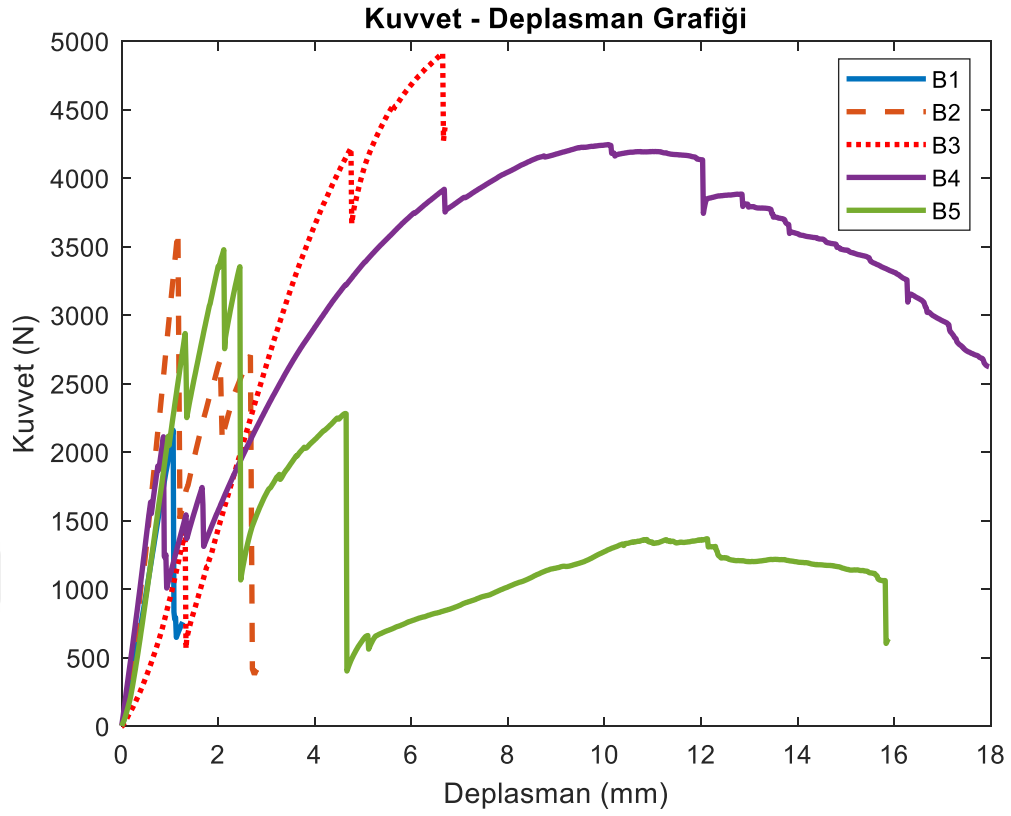
5.2.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların üç nokta eğme testi sonuçları

İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit üç nokta eğme testinde, numuneler sandviç yapının düzlemine dik bir eğme momentine maruz bırakılmıştır ve test kapsamında uygulanan kuvvete karşılık deplasman değerine ek olarak çekirdek kesme gerilmesi ve yüz malzemesinde meydana gelen gerilme değerleri elde edilip meydana gelen hasar modları değerlendirilmiştir. Şekil 5.8'de her bir numune için kuvvet

– deplasman grafikleri yer alırken Şekil 5.9’da ise test edilen tüm numunelerin kıyaslandığı kuvvet – deplasman grafiği yer almaktadır. Eğme yükü uygulanan yapılarda genel olarak yük uygulanan bölgenin içe doğru bükülmesi ve buna bağlı olarak çekirdek ezilmesi veya yüz malzemesinin çekirdekten ayrılması şeklinde hasarlar gözlemlenmiştir. Bazı numunelerde ise çekirdek derinliği boyunca yayılan eğilme çatlakları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan içi boşluklu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman grafikleri; (a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi, (e) B5 numunesi



Şekil 5.9. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği

Üç nokta eğme testinden elde edilen veriler çekirdek kayma dayanımı ve yüzey gerilmesi değerleri Denklem 5.3 ve 5.4'te yer alan ifadelerde kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemlerde, F_s^{nihar} ifadesi çekirdek kayma dayanımını, P_{maks} ifadesi hasara neden olan kuvveti, d sandviç yapının kalınlığını, c çekirdek yapının kalınlığını, b sandviç yapının genişliğini, S alt çenelere ait açıklık değerini ve t yüz malzemesinin kalınlığını belirtmektedir. Bu ifadeler kullanılarak elde edilen maksimum kuvvet, çekirdek kayma dayanımı ve yüzey gerilmesi değerleri Tablo 5.3'te yer almaktadır.

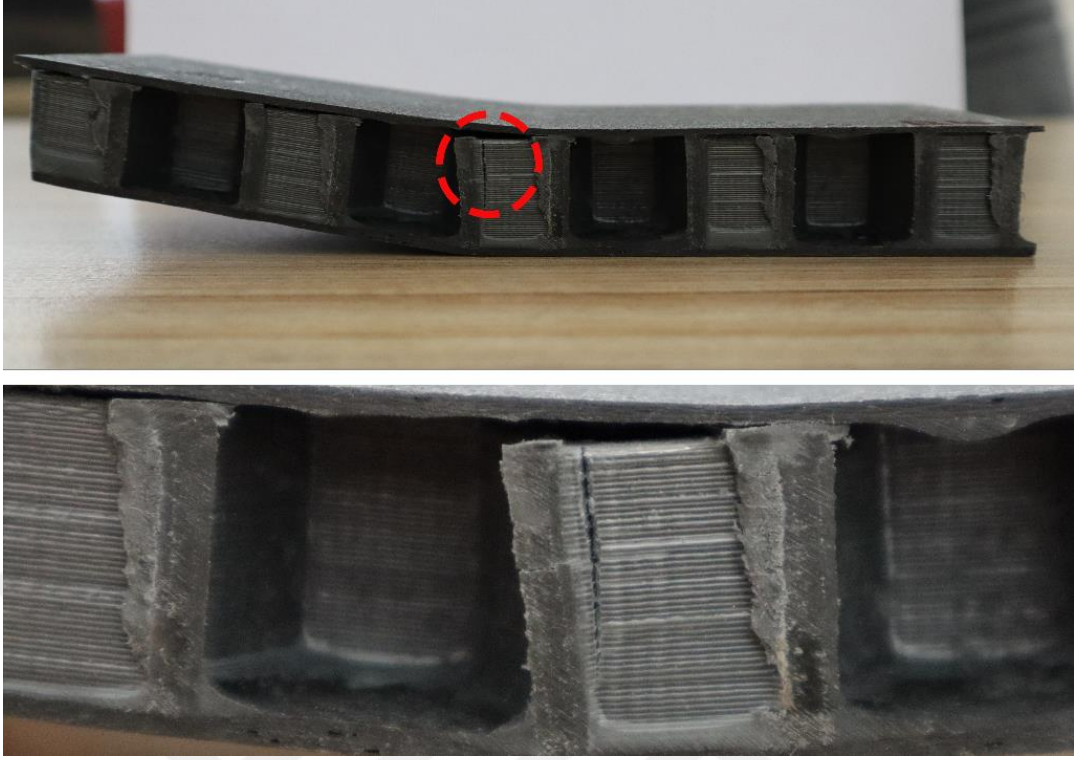
$$F_s^{nihar} = \frac{P_{maks}}{(d + c)b} \quad (5.3)$$

$$\sigma = \frac{P_{maks}S}{2t(d + c)b} \quad (5.4)$$

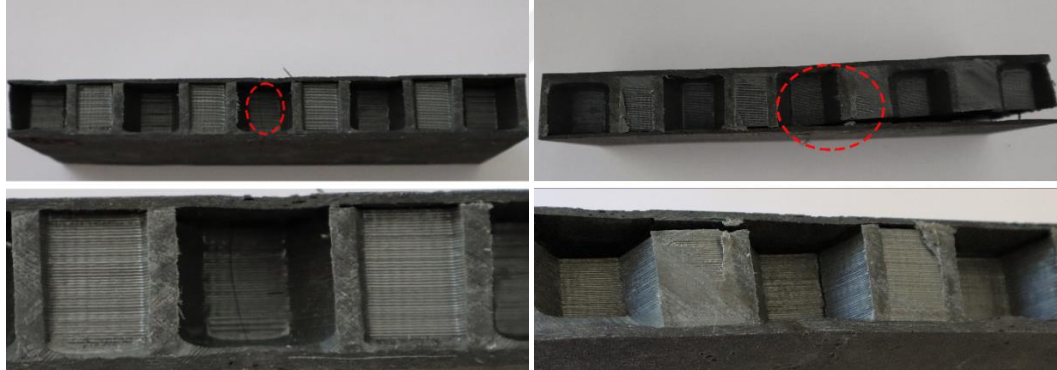
Tablo 5.3. İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip yapı için eğilme özellikleri

Numune	Maksimum Kuvvet (N)	Çekirdek Kayma Dayanımı (MPa)	Yüzey Gerilimi (MPa)
B1	3671,41	1,17	28,48
B2	3621,25	1,09	18,89
B3	4914,69	1,49	26,60
B4	4246,56	1,29	23,40
B5	3479,22	1,05	18,06
Ortalama	3986,63	1,22	23,08
Standart Sapma ($\pm$)	595,65	0,18	4,59

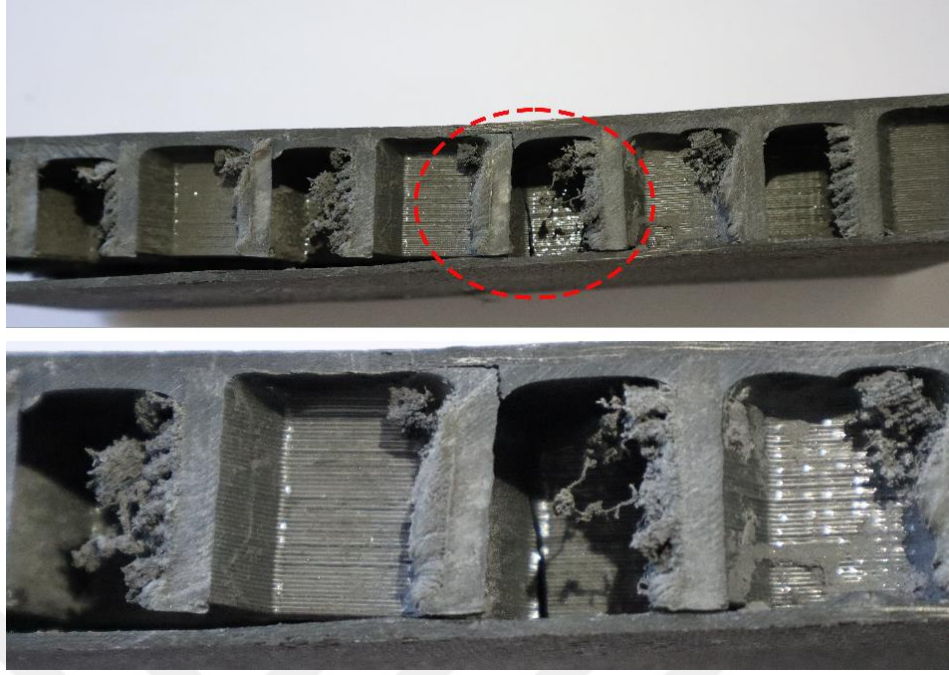
Tablo 5.3'te yer alan veriler incelendiğinde içi boşluklu bal peteği yapı numuneleri arasında B3 numunesi 4246,56 N ile en yüksek maksimum kuvvet, 1,49 MPa ile en yüksek çekirdek kayma dayanımı ve 26,60 MPa ile en yüksek yüzey gerilimi değerlerine ulaşmıştır. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler $3986,63 \pm 595,65$ N ortalama maksimum kuvvet, $1,22 \pm 0,18$ MPa ortalama çekirdek kayma dayanımı ve $23,08 \pm 4,59$ MPa ortalama yüzey gerilimi değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.10 ile 5.12 arasında üç nokta eğme testleri altında içi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde meydana gelen hasarlar gösterilmektedir. Şekil 5.10'daki yapıda çekirdek ezilmesi meydana gelmiştir ve buna bağlı olarak çekirdek – yüz ayrılması ve çekirdekte çatlak meydana gelmiştir. Şekil 5.11'de ise meydana gelen çekirdek çatlakları FDM baskılı çekirdek boyunca dikine ilerlemiştir ve son olarak Şekil 5.12'de ise eğme yükü ile birlikte çekirdekte kesme çatlağı ve buna bağlı olarak çekirdek – yüz ayrılması hasarları meydana gelmiştir.



Şekil 5.10. Meydana gelen çekirdek ezilmesi, çekirdek kırılması ve çekirdek – yüz ayrılması hataları



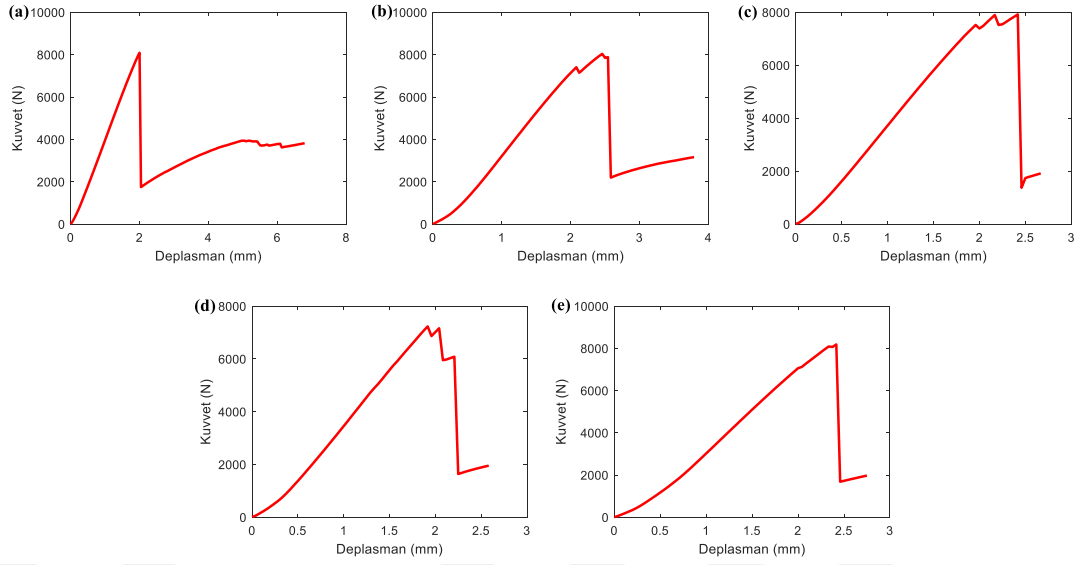
Şekil 5.11. Meydana gelen çekirdek kırılmaları ve tüm yüzey boyu dikine ilerleyişleri



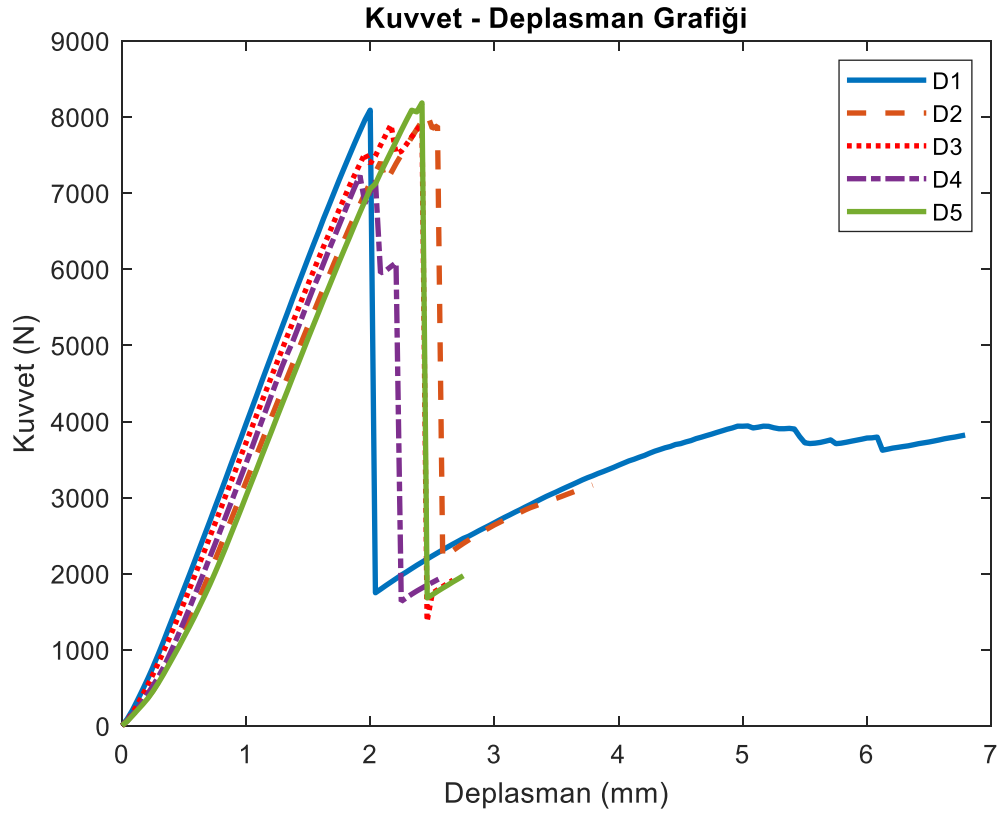
Şekil 5.12. Meydana gelen çekirdek kesme çatlağı ve çekirdek - yüz ayrılması hataları

5.2.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların üç nokta eğme testi sonuçları

Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerin üç nokta eğme testinde, sandviç kompozit yapının düzlemine dik bir eğme momentine maruz bırakılmıştır ve test kapsamında uygulanan kuvvete karşılık deplasman değerine ek olarak çekirdek kesme gerilmesi ve yüz malzemesinde meydana gelen gerilme değerleri elde edilip meydana gelen hasar modları değerlendirilmiştir. Şekil 5.13'te her bir numune için kuvvet – deplasman grafikleri yer alırken Şekil 5.14'te ise test edilen tüm numunelerin kıyaslandığı kuvvet – deplasman grafiği yer almaktadır. Eğme yükü uygulanan yapılarda genel olarak yük uygulanan bölgenin içe doğru bükülmesi ve buna bağlı olarak çekirdek yapıda çekirdek çatlakları, çekirdek kesme hasarları ve bazı bölgelerde yüzey ayrılmaları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.13. Üç nokta eğme testine maruz bırakılan poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli numunelerin her birine ait kuvvet - deplasman grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi, (e) D5 numunesi



Şekil 5.14. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneleri için kuvvet - deplasman grafiği

Üç nokta eğme testinden elde edilen veriler çekirdek kayma dayanımı ve yüzey gerilmesi değerleri Denklem 5.3 ve 5.4'te yer alan ifadelerde kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemlerde, F_s^{niah} ifadesi çekirdek kayma dayanımını, P_{maks} ifadesi hasara neden olan kuvveti, d sandviç yapının kalınlığını, c çekirdek yapının kalınlığını, b sandviç yapının genişliğini, S alt çenelere ait açıklık değerini ve t yüz malzemesinin kalınlığını belirtmektedir. Bu ifadeler kullanılarak elde edilen maksimum kuvvet, çekirdek kayma dayanımı ve yüzey gerilmesi değerleri Tablo 5.4'te yer almaktadır.

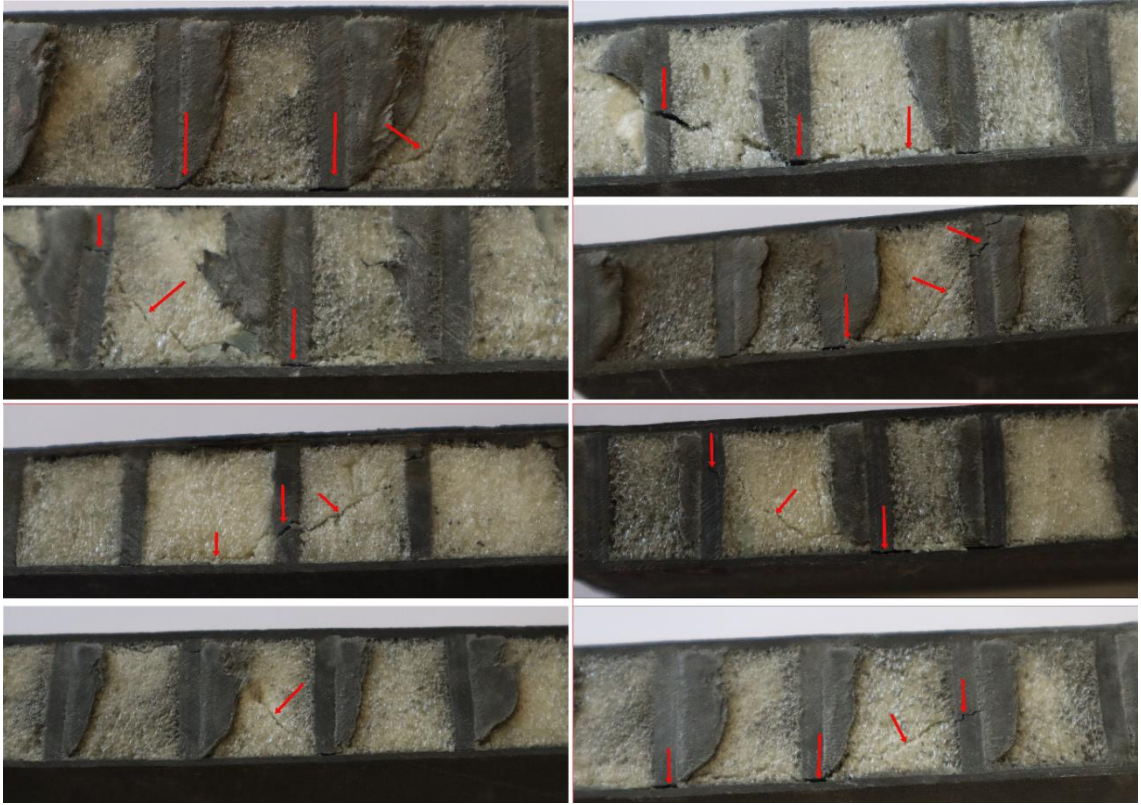
Tablo 5.4. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip yapı için eğilme özellikleri

Numune	Maksimum Kuvvet (N)	Çekirdek Kayma Dayanımı (MPa)	Yüzey Gerilimi (MPa)
D1	8091,88	2,52	52,70
D2	8041,25	2,47	47,83
D3	7921,25	2,50	50,80
D4	7232,50	2,26	50,88
D5	8187,50	2,51	52,21
Ortalama	7894,88	2,45	50,88
Standart Sapma ($\pm$)	382,53	0,11	1,89

Tablo 5.4'te yer alan veriler incelendiğinde poliüretan köpük dolgulu bal peteği yapı numuneleri arasında D5 numunesi 8187,50 N ile en yüksek maksimum kuvvet ve 2,51 MPa ile en yüksek çekirdek kayma dayanımı sergilerken, en yüksek yüzey gerilimini 52,70 MPa ile D1 numunesi sergilemiştir. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler için $7894,88 \pm 382,53$ N ortalama maksimum kuvvet, $2,45 \pm 0,11$ MPa ortalama çekirdek kayma dayanımı ve $50,88 \pm 1,89$ MPa ortalama yüzey gerilimi değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.15'te numunelerin test sonrası durumları gösterilmektedir, sonraki şekillerde ise meydana gelen hasarlar daha yakından incelenmiştir. Şekil 5.16'da ise eğme yükü sonrası çekirdek yapıda meydana çekirdek çatlakları, çekirdek kesme hasarları ve bazı bölgelerde görülen yüzey ayrılmaları daha detaylı gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Üç nokta eğme testi sonrası poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe sahip numunelerde meydana gelen hasarlar



Şekil 5.16. Poliüretan dolgulu çekirdek yapıda meydana çekirdek çatlakları, çekirdek kesme hasarları ve yüzey ayrılması hasarları

5.3. Kesme (Shear) Testi Sonuçları

5.3.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların kesme testi sonuçları

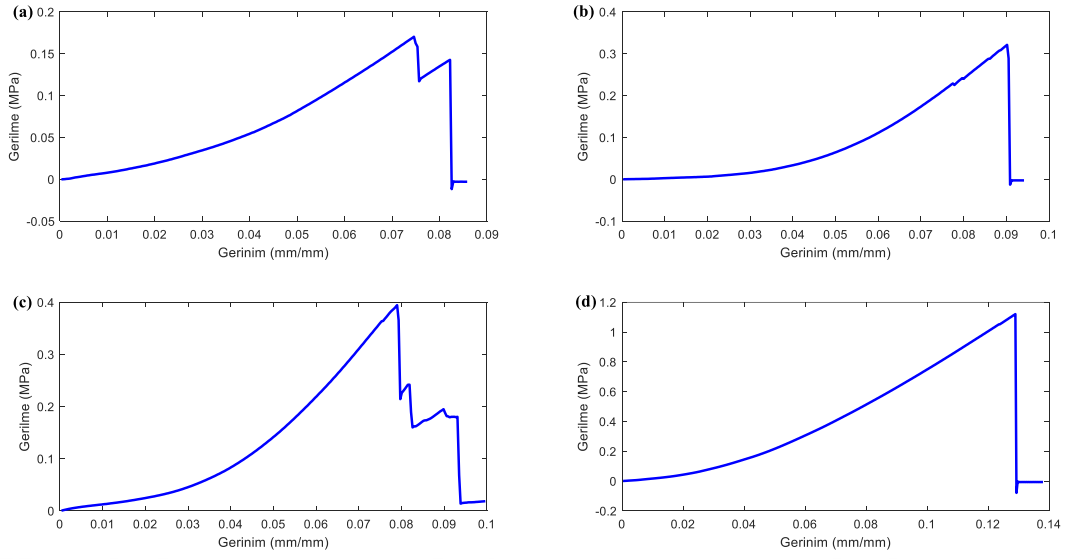
İçi boşluklu bal peteği çekirdeklere sahip numuneler sandviç yapının yüz kısımlarına paralel olan ve monoton olarak artan kesme (shear) kuvvetine maruz bırakılmıştır. Kesme kuvvetinin yapıya aktarılabilmesi için sandviç kompozitin yüz kısımlarına metal plakalar yapıştırılmıştır ve ters yönlü kuvvet uygulanmıştır. Elde edilen test verilerinden maksimum deplasman, kesme gerilmesi, kesme gerinimi ve çekirdek kesme modülü değerleri hesaplanmıştır, meydana gelen hasarlar değerlendirilmiştir. Şekil 5.17’de numunelere ait gerilme – gerinim grafikleri yer alırken Şekil 5.18’de ise tüm numuneler için gerilme – gerinim grafiği gösterilmektedir. Kesme testinden elde edilen veriler ile kesme gerilmesi (τ), kesme gerinimi (γ) ve çekirdek kesme modülü (G) değerleri sırasıyla Denklem 5.5, 5.6 ve 5.7 kullanılarak elde edilmiştir. Bu ifadelerde τ ifadesi kesme gerilimini, P numuneye uygulanan kuvvet değerlerini, L numune uzunluğunu, b numune genişliğini, γ kesme gerinimini, u numunede meydana gelen deplasman değerlerini, c çekirdek malzeme kalınlığını, G çekirdek kesme modülünü ifade etmektedir. Denklem 5.7’de yer alan $\Delta P/\Delta u$ ifadesi ise numunelerin kuvvet – deplasman grafiklerinin doğrusal kısmından elde edilen eğim değerini ifade etmektedir.

$$\tau = P/(L b) \quad (5.5)$$

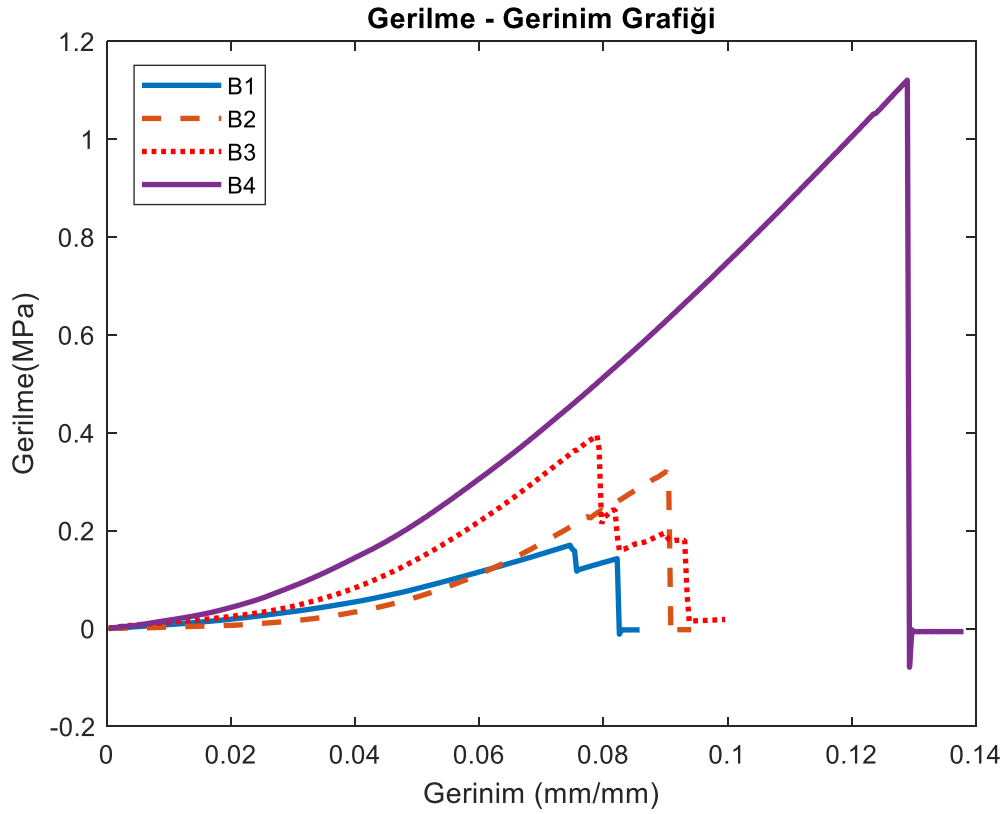
$$\gamma = u/c \quad (5.6)$$

$$G = \left(\frac{\Delta P}{\Delta u} \right) \frac{c}{L b} \quad (5.7)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta u} = \frac{P_b - P_a}{u_b - u_a}$$



Şekil 5.17. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler için gerilme - gerinim grafikleri; (a) B1 numunesi, (b) B2 numunesi, (c) B3 numunesi, (d) B4 numunesi



Şekil 5.18. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin tümü için gerilme - gerinim grafiği

Deneysel veriler ve Denklemler (5.5, 5.6 ve 5.7) kullanılarak elde edilen kesme gerilimi, maksimum deplasman, kesme gerinimi ve kuvvet deplasman grafiğinin lineer kısımlarından elde edilen eğim kullanılarak elde edilen kesme modülü değerleri Tablo 5.5'te yer almaktadır. Tablo 5.5'teki veriler incelendiğinde içi boşluklu bal peteği

çekirdekli sandviç kompozitlerin ortalama $2,14 \pm 0,57$ MPa kesme gerilimi, ortalama $0,093 \pm 0,024$ mm/mm kesme gerinimi ve ortalama $7,27 \pm 3,03$ MPa kesme modülü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.19(a)'da kesme testi öncesi numuneler yer alırken Şekil 5.19(b)'de kesme testi sonrası numuneler yer almaktadır. Şekiller incelendiğinde numunelerde meydana gelen hasarların çekirdek – yüz ayrılması şeklinde olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 5.5. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin kesme testine ait dayanım değerleri

Numune	Maksimum Deplasman (mm)	Kesme Gerilimi (MPa)	Kesme Gerinimi (mm/mm)	Kesme Modülü (MPa)
B1	0,17	1,72	0,074	3,34
B2	0,32	2,07	0,090	6,61
B3	0,39	1,82	0,0789	8,82
B4	1,12	2,97	0,128	10,34
Ortalama	0,50	2,14	0,093	7,27
Standart	0,42	0,57	0,024	3,03
Sapma ($\pm$)				



(a)

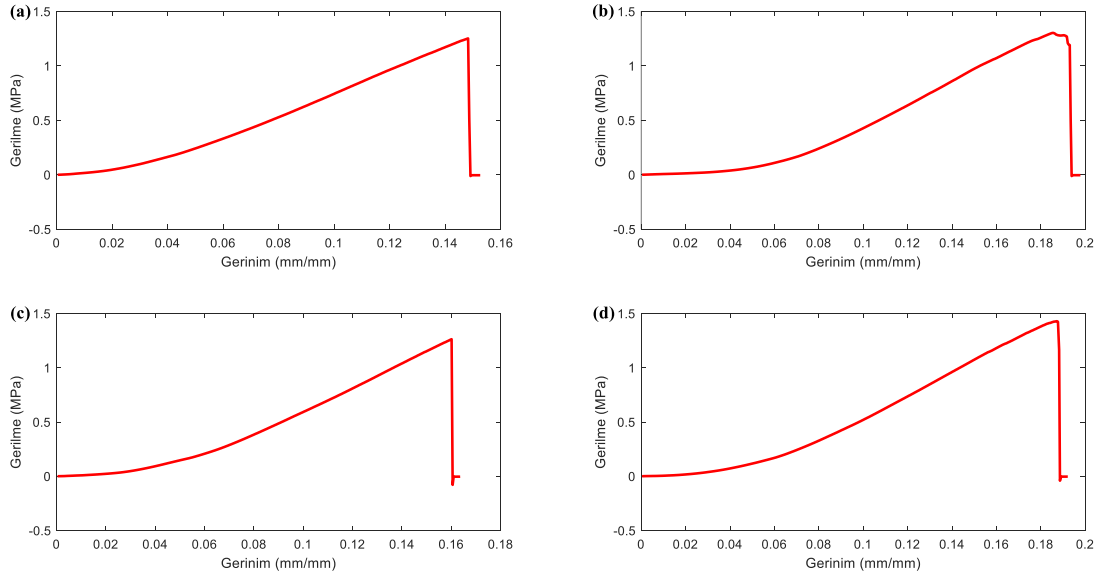


(b)

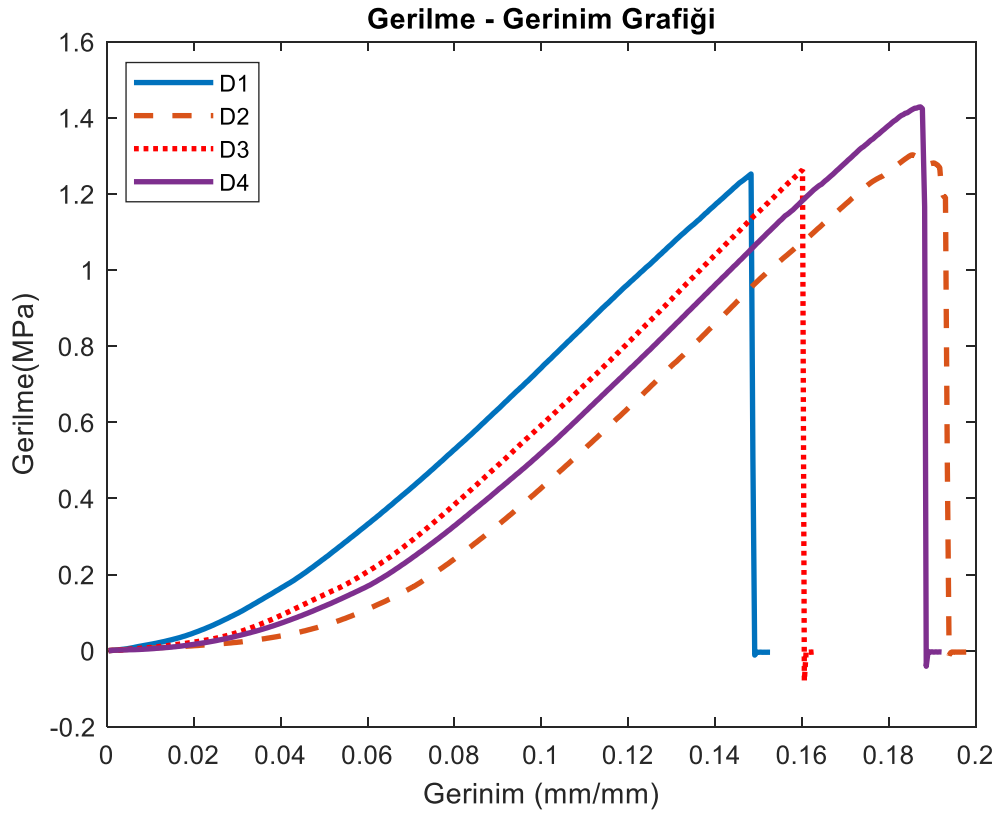
Şekil 5.19. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç numuneler için (a) kesme testi öncesi numuneler, (b) kesme testi sonrası numuneler

5.3.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların kesme testi sonuçları

Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli numuneler sandviç yapının yüz kısımlarına paralel olan ve monoton olarak artan kesme (shear) kuvvetine maruz bırakılmıştır. Kesme kuvvetinin yapıya aktarılabilmesi için sandviç kompozitin yüz kısımlarına metal plakalar yapıştırılmıştır ve ters yönlü kuvvet uygulanmıştır. Elde edilen test verilerinden maksimum deplasman, kesme gerilmesi, kesme gerinimi ve çekirdek kesme modülü değerleri hesaplanmıştır, meydana gelen hasarlar değerlendirilmiştir. Şekil 5.20’de numunelere ait gerilme – gerinim grafikleri yer alırken Şekil 5.21’de ise tüm numuneler için gerilme – gerinim grafiği gösterilmektedir. Kesme testinden elde edilen veriler ile poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekler için kesme gerilmesi (τ), kesme gerinimi (γ) ve çekirdek kesme modülü (G) değerleri sırasıyla Denklem 5.5, 5.6 ve 5.7 kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.20. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitler için gerilme - gerinim grafikleri; (a) D1 numunesi, (b) D2 numunesi, (c) D3 numunesi, (d) D4 numunesi



Şekil 5.21. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin tümü için gerilme - gerinim grafiği

Deneysel veriler ve Denklemler (5.5, 5.6 ve 5.7) kullanılarak elde edilen kesme gerilimi, maksimum deplasman, kesme gerinimi ve kuvvet deplasman grafiğinin lineer kısımlarından elde edilen eğim kullanılarak elde edilen kesme modülü değerleri Tablo 5.6’da yer almaktadır. Tablo 5.6’daki veriler incelendiğinde poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin ortalama $3,24 \pm 0,37$ MPa kesme gerilimi, ortalama $0,17 \pm 0,019$ mm/mm kesme gerinimi ve ortalama $10,47 \pm 0,20$ MPa kesme modülü değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.22(a)’da kesme testi öncesi numuneler yer alırken Şekil 5.22(b)’de kesme testi sonrası numuneler yer almaktadır. Şekiller incelendiğinde numunelerde meydana gelen hasarların çekirdek – yüz ayrılması şeklinde olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 5.6. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerin kesme testine ait dayanım değerleri

Numune	Maksimum Deplasman (mm)	Kesme Gerilimi (MPa)	Kesme Gerinimi (mm/mm)	Kesme Modülü (MPa)
D1	1,25	2,82	0,14	10,17
D2	1,30	3,53	0,18	10,55
D3	1,26	3,04	0,16	10,55
D4	1,42	3,56	0,18	10,64
Ortalama	1,31	3,24	0,17	10,47
Standart Sapma ($\pm$)	0,08	0,37	0,019	0,20



Şekil 5.22. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç numuneler için (a) kesme testi öncesi numuneler, (b) kesme testi sonrası numuneler

5.4. Su Emilimi Testi Sonuçları

5.4.1. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların su emilimi testi sonuçları

İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitler su emilimi testi kapsamında 192 saat boyunca su içeren bir beherde bekletilmiştir. Belirlenen süre tamamlandıktan sonra yapının nem emilim kabiliyetini ölçmek adına meydana gelen kütle artışı değerleri ölçülmüştür, elde edilen verilere göre yüzde bazında kütle artış değerleri Tablo 5.7’de gösterilmektedir. Değerler incelendiğinde içi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde ortalama $\%2,59 \pm 0,91$ oranında bir ağırlık artışı meydana gelmiştir.

Tablo 5.7. İçi boşluklu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde su emilimi testi sonra meydana gelen yüzdece ağırlık artışları

Numune	Yüzdece Ağırlık Artışı (%w)
B1	1,39
B2	3,22
B3	1,86
B4	3,51
B5	2,96
Ortalama	2,59
Standart Sapma (±)	0,91

5.4.2. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapıların su emilimi testi sonuçları

Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitler su emilimi testi kapsamında 192 saat boyunca su içeren bir beherde bekletilmiştir. Belirlenen süre tamamlandıktan sonra yapının nem emilim kabiliyetini ölçmek adına meydana gelen kütle artışı değerleri ölçülmüştür, elde edilen verilere göre yüzde bazında kütle artış değerleri Tablo 5.8’de gösterilmektedir. Değerler incelendiğinde poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde ortalama $3,07 \pm 0,46$ oranında bir ağırlık artışı meydana gelmiştir.

Tablo 5.8. Poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozitlerde su emilimi testi sonra meydana gelen yüzdece ağırlık artışları

Numune	Yüzdece Ağırlık Artışı (%w)
D1	3,56
D2	2,77
D3	2,97
D4	3,50
D5	2,51
Ortalama	3,07
Standart Sapma (±)	0,46

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada FDM tekniği ile üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA filamentten üretilen bal peteği çekirdek yapıları poliüretan köpük ile doldurulup karbonfiber yüz malzemeleri ile sandviç kompozit haline getirilmiştir. Üretilen malzemeler ilgili ASTM standartlarına göre düzlem içi basma (*edgewise compression*), üç nokta eğme, kesme (*shear*) ve su emilimi testlerine tabii tutulmuştur. Çalışma kapsamında FDM baskılı çekirdeklere yapılan poliüretan köpük dolgusunun mekanik özellikler üzerinde ve nem emilimi özellikleri üzerindeki özellikleri araştırılmıştır. Poliüretan köpük dolgusunun bu özelliklere etkilerini kıyaslayabilmek adına FDM tekniği ile üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA filamentten üretilen bal peteği yapıya herhangi bir dolgu işlemi uygulanmayıp, aynı karbonfiber malzemesi ve aynı epoksi sistemi ile sandviç kompozit üretilmiştir. Bu malzeme de aynı laboratuvar koşullarında aynı testlere tabii tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre;

- İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitler için düzlem içi basma testinde ortalama yüzey dayanımı $13,52 \pm 2,86$ MPa ve ortalama nihai basma dayanımı $124,50 \pm 20,80$ MPa olarak elde edilirken; poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerde ortalama yüzey dayanımı $23,43 \pm 3,49$ MPa ve ortalama nihai basma dayanımı $147,73 \pm 29,33$ MPa olarak elde edilmiştir. Poliüretan köpük dolgusunun ortalama yüzey dayanımını yaklaşık %74 oranında artırdığını ve ortalama nihai basma dayanımını da yaklaşık %19 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.
- İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitler için üç nokta eğme testinde ortalama çekirdek kayma dayanımı $1,22 \pm 0,18$ MPa ve ortalama yüzey gerilimi $23,08 \pm 4,59$ MPa olarak elde edilirken; poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerde ortalama çekirdek kayma dayanımı $2,45 \pm 0,11$ MPa ve ortalama yüzey gerilimi $50,88 \pm 1,89$ MPa olarak elde edilmiştir. Poliüretan köpük dolgusunun ortalama çekirdek kayma dayanımını yaklaşık %100 oranında artırdığını ve ortalama yüzey gerilimini de yaklaşık %120 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.
- İçi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitler için kesme testinde ortalama kesme gerilimi $2,14 \pm 0,57$ MPa ve ortalama kesme modülü $7,27 \pm 3,03$ MPa olarak elde edilirken; poliüretan köpük dolgulu çekirdeğe

sahip sandviç kompozitlerde ortalama kesme gerilimi $3,24 \pm 0,37$ MPa ve ortalama kesme modülü $10,47 \pm 0,20$ MPa olarak elde edilmiştir. Poliüretan köpük dolgusunun ortalama kesme gerilimi değerini yaklaşık %51 oranında artırdığını ve ortalama kesme modülü değerini de yaklaşık %44 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.

- Üretilen malzemelere uygulanan mekanik testler sonucunda meydana gelen hasar mekanizmaları literatür ile karşılaştırıldığında farklılıklar gözlemlenmese de meydana gelen hasarların oluşumu ve tüm yapıyı kaplama hızlarının yavaşladığı gözlemlenmiştir.
- Su emilimi testi ile yapıda meydana gelen yüzdece ağırlık artışı değerleri incelenerek yapının nem emilim karakteristiği değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre içi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitlerde $\%2,59 \pm 0,91$ oranında ağırlık artışı meydana gelirken; poliüretan köpük dolgulu sandviç kompozitlerde $\%3,07 \pm 0,46$ oranında ağırlık artışı meydana gelmiştir.

Araştırma amaç ve hedeflerinde belirtildiği gibi sandviç kompozitin basma, eğme ve kesme yükleri altındaki mukavemeti artırılmıştır, köpük yapıdaki çatlak oluşumu ve ilerleyişi yavaşlatılmıştır. Ancak nem emilimi hususunda amaç ve hedeflere ulaşılamamış, poliüretan köpük dolgulu yapının daha az nem tutması beklenirken içi boşluklu bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapılara göre %18 daha fazla su absorplamıştır. Bu durumun temel sebebinin ise poliüretan köpüğün herhangi bir yapıştırıcı kullanılmadan FDM tekniği ile üretilen çekirdeğin içerisinde oluşturulması ve dolayısıyla köpük ve yapı arasında meydana gelen gözeneklerin daha fazla su emilimi gerçekleştirmesinin olabileceği düşünülmektedir.

Özetle, FDM tekniği ile üretilen çekirdek yapılara yapılan poliüretan köpük dolgusu bu yapıların sandviç kompozit formlarında düzlem içi basma dayanımını, üç nokta eğme dayanımını ve kesme dayanımını önemli oranda artırarak araştırma amaçları kapsamında başarılı olmuştur.

KAYNAKÇA

- [1] Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials*. Boca Raton: CRC press.
- [2] Bouvet, C. (2017). *Mechanics of Aeronautical Composite Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [3] Herrmann, A. S., Zahlen, P. C., & Zuardy, I. (2005). Sandwich structures technology in commercial aviation. O.T. Thomsen, E. Bozhevolnaya ve A. Lyckegaard (Editörler), *Sandwich structures 7: Advancing with sandwich structures and materials* içinde (s. 13-26). Springer, Dordrecht.
- [4] Toozandehjani, M., Kamarudin, N., Dashtizadeh, Z., Lim, E. Y., Gomes, A., Gomes, C. (2018). Conventional and advanced composites in aerospace industry: Technologies revisited. *Am. J. Aerosp. Eng*, 5, 9-15.
- [5] Callister, W.D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Material science and engineering an introduction*. USA: John Wiley & Sons.
- [6] Xiong, J., Du, Y., Mousanezhad, D., Eydani Asl, M., Norato, J., Vaziri, A. (2019). Sandwich structures with prismatic and foam cores: a review. *Advanced Engineering Materials*, 21(1), 1800036.
- [7] Gibson, L. ve Ashby, M. (1997). The mechanics of honeycombs. L.J. Gibson ve M.F. Ashby (Editörler) *Cellular Solids: Structure and Properties* içinde (s. 93 – 174). Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Abbadi, A., Tixier, C., Gilgert, J., & Azari, Z. (2015). Experimental study on the fatigue behaviour of honeycomb sandwich panels with artificial defects. *Composite Structures*, 120, 394-405.
- [9] Caglayan, C., Gurkan, I., Gungor, S., Cebeci, H. (2018). The effect of CNT-reinforced polyurethane foam cores to flexural properties of sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 115, 187-195.
- [10] Lee, L. J., Zeng, C., Cao, X., Han, X., Shen, J., Xu, G. (2005). Polymer nanocomposite foams. *Composites science and technology*, 65(15-16), 2344-2363.
- [11] Polymethacrylimide Foam for Damage Tolerant Structures for Better Damage Visibility in Aerospace Components. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10501> (Erişim tarihi: 25.04.2022).

- [12] *In Flight: Evonik solutions for the aviation and aerospace market*. Evonik Industries. <https://industrial.vestakeep.com/product/peek-industrial/downloads/aviation-brochure-en.pdf> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [13] Rahman, M. M., Rabbani, M. M., Saha, J. K. (2019). Polyurethane and Its Derivatives. In *Functional Polymers* (pp. 225-240). Springer, Cham.
- [14] Chemami, A., Bey, K., Gilgert, J., Azari, Z. (2012). Behaviour of composite sandwich foam-laminated glass/epoxy under solicitation static and fatigue. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1178-1184.
- [15] Steeves, C. A., ve Fleck, N. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(4), 561-583.
- [16] Eyvazian, A., Taghizadeh, S. A., Hamouda, A. M., Tarlochan, F., Moeinifard, M., Gobbi, M. (2021). Buckling and crushing behavior of foam-core hybrid composite sandwich columns under quasi-static edgewise compression. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(7), 2643-2670.
- [17] Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. (2nd ed.) New York: Springer.
- [18] Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5), 1191-1203.
- [19] <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [20] Behera, A. (2022). Additive Manufacturing Materials. *Advanced Materials* içinde (s. 667-697). Switzerland: Springer, Cham.
- [21] Badiru, A. B., Valencia, V. V., & Liu, D. (2017). *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry*. Boca Raton: CRC Press.
- [22] Gebhardt, A. (2011). *Understanding additive manufacturing*. München: Hanser Publications.
- [23] <https://all3dp.com/1/stl-file-format-3d-printing/> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [24] <https://www.impactlabs.tech/the-complete-guide-to-3d-printing-ch-8/?lang=en> (Erişim tarihi: 25.04.2022)

- [25] <https://www.simplify3d.com/support/articles/3d-printing-gcode-tutorial/> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [26] <https://www.cnckitchen.com/blog/g-code-basics-for-3d-printing> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [27] <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012733080-What-is-g-code-> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [28] Ali, A., Ahmad, U., ve Akhtar, J. (2020). 3D printing in pharmaceutical sector: An overview. *Pharmaceutical Formulation Design-Recent Practices*.
- [29] Wong, K. V., ve Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- [30] Lim, C. W. J., Le, K. Q., Lu, Q., Wong, C. H. (2016). An overview of 3-D printing in manufacturing, aerospace, and automotive industries. *IEEE potentials*, 35(4), 18-22.
- [31] Źivanović, S. T., Popović, M. D., Vorkapić, N. M., Pjević, M. D., Slavković, N. R. (2020). An overview of rapid prototyping technologies using subtractive, additive and formative processes. *FME Transactions*, 48(1), 246-253.
- [32] Friedrich, K., ve Walter, R. (Eds.). (2020). *Structure and properties of additive manufactured polymer components*. Woodhead Publishing.
- [33] Aydın, L., ve Küçük, S. (2017). Üç boyutlu yazıcı ve tarayıcı ile hastaya özel medikal ortez tasarımı ve geliştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 1-8.
- [34] Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y. G., & Zhang, J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. J. Zhang ve Y.G. Jung (Editörler). *Additive Manufacturing* içinde (s. 39-51). Butterworth-Heinemann.
- [35] Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., Rajkumar, S. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405-409.
- [36] Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., Raiput, S.K., Sonia, P., Singhai, P., Saxena, K. K. (2020). Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3058-3070.
- [37] Lee, H., Lim, C. H. J., Low, M. J., Tham, N., Murukeshan, V. M., Kim, Y. J. (2017). Lasers in additive manufacturing: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(3), 307-322.

- [38] Diegel, O., Nordin, A., & Motte, D. (2019). Additive manufacturing technologies. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing* içinde (s. 19-39). Singapore: Springer.
- [39] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. (2021). Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing Technologies (3rd ed.)* içinde (s. 125-169). Switzerland: Springer, Cham.
- [40] Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4), 041101.
- [41] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *materials*, 10(6), 672.
- [42] Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.
- [43] <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-heat-sintering-shs> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [44] <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/selective-heat-sintering-shs-3d-printing/> (Erişim tarihi: 25.04.2022)
- [45] Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., Lee, J.H., Zhang, J. (2018). Additive manufacturing of metallic materials: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13.
- [46] Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y. G., Zhang, J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. *Additive Manufacturing* içinde (s. 39-51). Butterworth-Heinemann.
- [47] Hehr, A., ve Norfolk, M. (2019). A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*.
- [48] Molitch-Hou, M. (2018). Overview of additive manufacturing process. *Additive manufacturing* içinde (s. 1-38). Butterworth-Heinemann.
- [49] Parupelli, S., ve Desai, S. (2019). A comprehensive review of additive manufacturing (3d printing): processes, applications and future potential. *American journal of applied sciences*, 16(8).

- [50] Moghaddam, N. S., Jahadakbar, A., Amerinatanzi, A., ve Elahinia, M. (2017). Recent advances in laser-based additive manufacturing. *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*, 1-24.
- [51] Miyanaji, H., Rahman, K. M., Da, M., ve Williams, C. B. (2020). Effect of fine powder particles on quality of binder jetting parts. *Additive Manufacturing*, 36, 101587.
- [52] Miyanaji, H., Momenzadeh, N., ve Yang, L. (2018). Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing*, 20, 1-10.
- [53] Shrestha, S., ve Manogharan, G. (2017). Optimization of binder jetting using Taguchi method. *Jom*, 69(3), 491-497.
- [54] Ziaee, M., ve Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.
- [55] Yanez-Sanchez, S. I., Lennox, M. D., Therriault, D., Favis, B. D., ve Tavares, J. R. (2021). Model Approach for Binder Selection in Binder Jetting. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(42), 15162-15173.
- [56] Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 100707.
- [57] Du, W., Ren, X., Ma, C., ve Pei, Z. (2017, November). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: A literature review. Tampa, Florida, USA. Nov. 3-9, 2017. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* Vol. 58493, p. V014T07A006, ISBN: 978-0-7918-5849-3.
- [58] Lores, A., Azurmendi, N., Agote, I., Zuza, E. (2019). A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: materials and process characteristics. *Powder Metallurgy*, 62(5), 267-296.
- [59] Gonzalez, J. A., Mireles, J., Lin, Y., Wicker, R. B. (2016). Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*, 42(9), 10559-10564.

- [60] Al Rashid, A., Ahmed, W., Khalid, M. Y., Koç, M. (2021). Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing*, 47, 102279.
- [61] Appuhamillage, G. A., Chartrain, N., Meenakshisundaram, V., Feller, K. D., Williams, C. B., Long, T. E. (2019). 110th anniversary: Vat photopolymerization-based additive manufacturing: Current trends and future directions in materials design. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(33), 15109-15118.
- [62] Zhang, F., Zhu, L., Li, Z., Wang, S., Shi, J., Tang, W., Li, N., Yang, J. (2021). The recent development of vat photopolymerization: A review. *Additive Manufacturing*, 48, 102423.
- [63] Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q. P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., Mesicek, J. (2021). A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing. *Polymers*, 13(4), 598.
- [64] Xu, X., Awad, A., Robles-Martinez, P., Gaisford, S., Goyanes, A., Basit, A. W. (2021). Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 329, 743-757.
- [65] Huang, J., Qin, Q., ve Wang, J. (2020). A review of stereolithography: Processes and systems. *Processes*, 8(9), 1138.
- [66] Schmidleithner, C., ve Kalaskar, D. M. (2018). Stereolithography. IntechOpen.
- [67] Pazhamannil, R. V., ve Govindan, P. (2021). Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization. *Materials Today: Proceedings*, 43, 130-136.
- [68] Taormina, G., Sciancalepore, C., Messori, M., Bondioli, F. (2018). 3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends. *Journal of applied biomaterials & functional materials*, 16(3), 151-160.
- [69] Bae, S. U., ve Kim, B. J. (2021). Effects of Cellulose Nanocrystal and Inorganic Nanofillers on the Morphological and Mechanical Properties of Digital Light Processing (DLP) 3D-Printed Photopolymer Composites. *Applied Sciences*, 11(15), 6835.
- [70] Dávila, J. L., Neto, P. I., Noritomi, P. Y., Coelho, R. T., da Silva, J. V. L. (2020). Hybrid manufacturing: A review of the synergy between directed energy

- deposition and subtractive processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(11), 3377-3390.
- [71] Tang, Z. J., Liu, W. W., Wang, Y. W., Saleheen, K. M., Liu, Z. C., Peng, S. T., Zhang, Z., Zhang, H. C. (2020). A review on in situ monitoring technology for directed energy deposition of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(11), 3437-3463.
- [72] Dutta B. Directed Energy Deposition (DED) Technology. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* 2022;3:66-84.
- [73] Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J.M., Lavernia, J.E., Eliaz, N. (2021). Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 49, 271-295.
- [74] Ahn, D. G. (2021). Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 703-742.
- [75] Liu, Z., He, B., Lyu, T., Zou, Y. (2021). A Review on Additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V. *Jom*, 73(6), 1804-1818.
- [76] Gülcan, O., Günaydın, K., ve Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, 13(16), 2829.
- [77] Leary, M. (2020). Material jetting, *Design for additive manufacturing* içinde (s. 269-282). Elsevier.
- [78] Gardan, J. (2016). Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *International Journal of Production Research*, 54(10), 3118-3132.
- [79] Sireesha, M., Lee, J., Kiran, A. S. K., Babu, V. J., Kee, B. B., Ramakrishna, S. (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC advances*, 8(40), 22460-22468.
- [80] Pilipović, A., Baršić, G., Katić, M., Rujnić Havstad, M. (2020). Repeatability and reproducibility assessment of a PolyJet technology using x-ray computed tomography. *Applied Sciences*, 10(20), 7040.
- [81] Maguire, A., Pottackal, N., Saadi, M. A. S. R., Rahman, M. M., Ajayan, P. M. (2021). Additive manufacturing of polymer-based structures by extrusion technologies. *Oxford Open Materials Science*, 1(1), itaa004.

- [82] Shaqour, B., Abuabiah, M., Abdel-Fattah, S., Juaidi, A., Abdallah, R., Abuzaina, W., Qarout, M., Verleijje, B., Cos, P. (2021). Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(5), 1279-1291.
- [83] Hsiang Loh, G., Pei, E., Gonzalez-Gutierrez, J., Monzón, M. (2020). An overview of material extrusion troubleshooting. *Applied Sciences*, 10(14), 4776.
- [84] Zhuo, P., Li, S., Ashcroft, I. A., Jones, A. I. (2021). Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109143.
- [85] Pal, A. K., Mohanty, A. K., Misra, M. (2021). Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective. *RSC Advances*, 11(58), 36398-36438.
- [86] Jiang, J., ve Fu, Y. F. (2020). A short survey of sustainable material extrusion additive manufacturing. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1-10.
- [87] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., Md Akil, H. (2019). Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*, 59(4), 589-624.
- [88] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., Bowyer, A. (2011). RepRap—the replicating rapid prototyper. *Robotica*, 29(1), 177-191.
- [89] Zhang, P., Wang, Z., Li, J., Li, X., Cheng, L. (2020). From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1594-1609.
- [90] Shanmugam, V., Pavan, M. V., Babu, K., Karnan, B. (2021). Fused deposition modeling based polymeric materials and their performance: A review. *Polymer Composites*, 42(11), 5656-5677.
- [91] Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., Goh, G. L., Yeong, W. Y. (2020). Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113-133.
- [92] Penumakala, P. K., Santo, J., veThomas, A. (2020). A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108336.

- [93] Medellin-Castillo, H. I., ve Zaragoza-Siqueiros, J. (2019). Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32(1), 1-16.
- [94] Bakır, A. A., Atik, R., ve Özerinç, S. (2021). Mechanical properties of thermoplastic parts produced by fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*.
- [95] Mohamed, O. A., Masood, S. H., ve Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in manufacturing*, 3(1), 42-53.
- [96] Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G., Etches, J. (2017). The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 3(1), 21-31.
- [97] Galatas, A., Hassanin, H., Zweiri, Y., Seneviratne, L. (2018). Additive manufactured sandwich composite/ABS parts for unmanned aerial vehicle applications. *Polymers*, 10(11), 1262.
- [98] Brischetto, S., Ferro, C. G., Torre, R., Maggiore, P. (2018). 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. *Curved and Layered Structures*, 5(1), 80-94.
- [99] Jiang, W., Yan, L., Ma, H., Fan, Y., Wang, J., Feng, M., Qu, S. (2018). Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb. *Scientific reports*, 8(1), 1-7.
- [100] Khosravani, M. R., Zolfagharian, A., Jennings, M., Reinicke, T. (2020). Structural performance of 3D-printed composites under various loads and environmental conditions. *Polymer testing*, 91, 106770.
- [101] Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., Hirano, Y. (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114-121.
- [102] Zhang, P., Arceneaux, D. J., ve Khattab, A. (2018). Mechanical properties of 3D printed polycaprolactone honeycomb structure. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(12), 46018.

- [103] Brischetto, S., ve Torre, R. (2020). Honeycomb Sandwich Specimens Made of PLA and Produced Via 3D FDM Printing Process: An Experimental Study. *J. Aircr. Spacecr. Technol*, 4, 54-69.
- [104] Pathipaka, R. K., Namala, K. K., Sunkara, N., Bandaru, C. R. (2020). Damage characterization of sandwich composites subjected to impact loading. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 22(7), 2125-2138.
- [105] Zaharia, S. M., Enescu, L. A., ve Pop, M. A. (2020). Mechanical performances of lightweight sandwich structures produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Polymers*, 12(8), 1740.
- [106] Joseph, A., Mahesh, V., ve Mahesh, V. (2021). Effect of loading rates on the in-plane compressive properties of additively manufactured ABS and PLA-based hexagonal honeycomb structures. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057211051416.
- [107] Pirouzfard, S., ve Zeinedini, A. (2021). Effect of geometrical parameters on the flexural properties of sandwich structures with 3D-printed honeycomb core and E-glass/epoxy Face-sheets. In *Structures* (Vol. 33, pp. 2724-2738). Elsevier.
- [108] de Castro, B. D., Magalhães, F. D. C., Panzera, T. H., Campos Rubio, J. C. (2021). An assessment of fully integrated polymer sandwich structures designed by additive manufacturing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5031-5038.
- [109] Gohar, S., Hussain, G., Ali, A., Ahmad, H. (2021). Mechanical performance of honeycomb sandwich structures built by FDM printing technique. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 0892705721997892.
- [110] Mozafari, H., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E. (2015). In plane compressive response and crushing of foam filled aluminum honeycombs. *Journal of Composite Materials*, 49(26), 3215-3228.
- [111] Mozafari, H., Khatami, S., Molatefi, H., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E. (2016). Finite element analysis of foam-filled honeycomb structures under impact loading and crashworthiness design. *International journal of crashworthiness*, 21(2), 148-160.
- [112] Liu, Q., Fu, J., Wang, J., Ma, J., Chen, H., Li, Q., Hui, D. (2017). Axial and lateral crushing responses of aluminum honeycombs filled with EPP foam. *Composites Part B: Engineering*, 130, 236-247.

- [113] Hassanpour Roudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H., Hadavinia, H. (2019). Experimental investigation of impact loading on honeycomb sandwich panels filled with foam. *International Journal of Crashworthiness*, 24(2), 199-210.
- [114] Jayaram, R. S., Nagarajan, V. A., ve Vinod Kumar, K. P. (2019). Compression and low velocity impact response of sandwich panels with polyester pin-reinforced foam filled honeycomb core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(6), 2014-2030.
- [115] Zhang, Y., Liu, Q., He, Z., Zong, Z., Fang, J. (2019). Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with Expanded Polypropylene foam. *Composites Part B: Engineering*, 156, 17-27.
- [116] Hassanpour Roudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H., Hadavinia, H. (2020). High-velocity impact loading in honeycomb sandwich panels reinforced with polymer foam: a numerical approach study. *Iranian Polymer Journal*, 29(8), 707-721.
- [117] Yan, L., Zhu, K., Zhang, Y., Zhang, C., Zheng, X. (2020). Effect of Absorbent Foam Filling on Mechanical Behaviors of 3D-Printed Honeycombs. *Polymers*, 12(9), 2059.
- [118] Mohamadi, Y., Ahmadi, H., Razmkhah, O., Liaghat, G. (2021). Axial crushing responses of aluminum honeycomb structures filled with elastomeric polyurethane foam. *Thin-Walled Structures*, 164, 107785.
- [119] Safarabadi, M., Haghighi-Yazdi, M., Sorkhi, M. A., Yousefi, A. (2021). Experimental and numerical study of buckling behavior of foam-filled honeycomb core sandwich panels considering viscoelastic effects. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(8), 3985-4015.
- [120] Jayaram, R. S., Nagarajan, V. A., Kumar, K. V. (2022). Low velocity impact and compression after impact behaviour of polyester pin-reinforced foam filled honeycomb sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(1), 157-173.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : TUNCA Erdem
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Bilgileri

- Yüksek Lisans (2019-2022), Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı
- Lisans (2015-2019), Anadolu Üniversitesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019 –	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu	Araştırma Görevlisi

Yayınlar

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler (SCI, SSCI, AHCI)

- Tunca, E., Saribas, H., Kafalı, H., & Kahvecioglu, S. (2021). Determining the pointer positions of aircraft analog indicators using deep learning. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler (ULAKBİM)

- Tunca, E., & Kafalı, H. Compression and Three-Point Bending Analyzes of Aerospace Sandwich Composites produced with Polymeric Core Materials with ANSYS. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 553-561.

Bildiriler

- Tunca Erdem, Kafalı Haşim, 2020. The Usage Potential of Polymeric Nanofibers Produced with Electrospinning Technique in Aircraft Composite Materials. *V. International Scientific and Vocational Studies Congress - Engineering (BILMES EN 2020)*
- Güçlü İbrahim, Tunca Erdem, Kafalı Haşim, 2020. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and Maintenance Applications. *V. International Scientific and Vocational Studies Congress - Engineering (BILMES EN 2020)*
- Kafalı Haşim, Tunca Erdem, 2019. Uçak Bakım Alanında Bakım Planlamanın Önemi. *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019)*