

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3B EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL KAFES
YAPILI SANDVIÇ PANELLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Necati ERCAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**3B EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL KAFES
YAPILI SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Necati ERCAN
(181212872002)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS

TEMMUZ 2019

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181212872002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Necati ERCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "3B EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL KAFES YAPILI SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ " başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ**
Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Deniz UZUNSOY
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 17 Temmuz 2019

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi/...../.....

İNTİHAL BEYANI

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

Öğrencinin Adı Soyadı: Necati ERCAN

İmzası :

X X X X



Çok değerli aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS' a tüm destekleri için sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Yine çalışmamda konu, kaynak ve yöntem açısından bana yardımda bulunarak yol gösteren, kıymetli Prof. Dr. Bahattin KANBER'e de sonsuz teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca çalışmam boyunca vermiş oldukları desteklerden dolayı değerli oda arkadaşlarım ve dostlarım Arş. Gör. Osman Bedrettin KARATAŞ ve Arş. Gör. Ramazan ASLAN'a da sonsuz teşekkürler.

En büyük teşekkürü hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili annem Berna ERCAN, babam Mehmet ERCAN ve kardeşlerim ile gelecekteki yol arkadaşım, nişanlım Sümeyye TEKELİOĞLU'na sunuyorum. Bu günlere gelmemde büyük emeğe sahip, maddi ve manevi her türlü desteği ile en büyük yol göstericim olan rahmetli dedem Necati ERCAN'ı şükran ve minnetle anıyorum.

Temmuz 2019

Necati ERCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiv
SUMMARY.....	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Tezin Taslağı.....	4
2. LİTERATÜRÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ.....	6
2.1 Hücresel Malzemeler	6
2.1.1 Stokastik Köpükler	8
2.1.2 Periyodik Hücresel Malzemeler	10
2.1.3 Açık ve Kapalı Hücre Yapısı	11
2.1.4 Çekme ve Eğilme Baskın Davranış	12
2.1.5 İzafi Yoğunluk Kavramı	15
2.2 Sandviç Yapılar	16
2.3 Eklemeli Üretim	19
2.4 Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların İncelenmesi.....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1 Numunelerin Tasarımı	35
3.1.1 Birim hücrelerin tasarımı	35
3.1.2 Basma numunelerinin tasarımı.....	36
3.1.3 Eğme numunelerinin tasarımı	37
3.2 Numunelerin Üretimi.....	38
3.2.1 Çekme numunelerinin üretimi.....	38
3.2.2 Basma numunelerinin üretimi	38
3.2.3 Eğme numunelerinin üretimi	40
3.2.3.1 Eğme numunelerinin eriyik yığma modelleme yöntemi ile üretilmesi	40
3.2.3.2 Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak sandviç kompozit eğme numunelerin üretilmesi.....	41
3.3 Mekanik Testler.....	46
3.3.1 Çekme testi.....	46
3.3.2 Basma testi	48
3.3.3 Eğme testi.....	49
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	51
4.1 Çekme Testi Sonuçları.....	51

4.1.1 PLA malzemesi için işleme sıcaklığı değişiminin çekme özellikleri üzerine etkisi.....	51
4.1.2 CFR-PLA malzemesi için işleme sıcaklığı değişiminin çekme özellikleri üzerine etkisi.....	52
4.2 Basma Testi Sonuçları.....	53
4.2.1 Basma özelliklerinin, birim hücre şekline bağlı değişimi.....	54
4.2.1.1 PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi.....	55
4.2.1.2 CFR-PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi.....	59
4.2.2 Basma özelliklerinin, izafi yoğunluğa bağlı değişimi.....	63
4.2.2.1 PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi.....	63
4.2.2.2 CFR-PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi.....	68
4.2.3 Basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	71
4.2.3.1 Dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	72
4.2.3.2 Yatay bal peteği birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	73
4.2.3.3 Dikey truss birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	74
4.2.3.4 Yatay truss birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	76
4.2.3.5 Gyroid birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	77
4.2.3.6 Kübik birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	78
4.3 Eğme Testi Sonuçları.....	80
4.3.1 Eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi.....	80
4.3.1.1 EYM ile üretilen numuneler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi.....	80
4.3.1.2 Kompozit sandviç numuneler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi.....	82
4.3.2 EYM ile üretilen numunelere yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi.....	84
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	89
5.1 Sonuçlar.....	89
5.2 Öneriler.....	91
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAD	: Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım
CF	: Carbon Fiber - Karbon Fiber
CFPLA	: Karbon fiber plaka takviyeli PLA sandviç kompozit
CFR-PLA	: CF Reinforced Polylactic Acid - Karbon Fiber Takviyeli PLA
DMLS	: Direct Metal Laser Sintering - Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EBM	: Elektron Beam Melting – Elektron Işın Ergitme
EBW	: Elektron Beam Welding – Elektron Işın Kaynaklama
EYM	: Eriyik Yığıma Modelleme
FDM	: Fused Deposition Modeling
LENS	: Laser Engineered Net Shaping - Lazerle İşlenmiş Net Şekillendirme
LOM	: Laminated Object Manufacturing - Katmanlı Nesne Üretimi
PA12	: Poliamid 12
PEEK	: Polieter Eter Keton
PETG	: Glikol ile modifiye edilmiş polietilentereftalat
PJ	: Polijet
PLA	: Polilaktik Asit
RPPL	: Mükemmel Plastik Kitleme Modeli
SEM	: Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolithography - Stereolitografi
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
STL	: STereoLithography
TPU	: Termoplastik Poliüretan
U-CFRP	: Undirectional CFRP - Tek Yönlü Karbon Fiber Takviyeli Polimer
W-CFRP	: Woven CFRP - Dokuma Karbon Fiber Takviyeli Polimer

SEMBOLLER

A	: Numunenin kesit alanı
A₀	: Numunenin ilk kesit alanı
E	: Elastisite modülü
EI	: Eğilme rijitliği
e	: Birim şekil değişimi
e_b	: Basma birim şekil değişimi
F	: Kuvvet
l	: Numunenin boyu
l₀	: Numunenin ilk boyu
l_i	: Numunenin P _i yükü altındaki uzunluğu
M	: Moment
P	: Yük
P₀	: İlk yük
P_i	: Basma yükü
ρ	: Yoğunluk
ρ*	: Hücresel malzemenin yoğunluğu
ρ_s	: Hücresel malzemenin tamamen dolu haldeki yoğunluğu
ε	: Gerçek şekil değişimi
ε_e	: Elastiklik sınırı
ε_D	: Yoğunlaşmış birim şekil değişimi
σ	: Gerilme
σ_a	: Akma dayanımı
σ_b	: Basma dayanımı
σ_ç	: Çekme dayanımı
σ_e	: Eğme dayanımı
σ_{E max}	: Elastik bölgedeki maksimum gerilme
σ_{pl}	: Plato gerilmesi
δ	: Kopma uzaması
φ	: Kesit büzülmesi
δ	: Sehim
v	: Poisson oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı hücrese malzemelerin izafi yoğunluk değeri	16
Çizelge 2.2 : Sandviç yapıların avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.....	19
Çizelge 2.3 : Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması.....	23
Çizelge 2.4 : EYM yönteminde farklı işleme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar	26
Çizelge 3.1 : PLA ve CFR-PLA malzemeleri için işleme parametreleri	39
Çizelge 4.1 : PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin izafi yoğunluğa ve birim hücre şekline bağlı elastisite modüllerinin karşılaştırılması.....	58
Çizelge 4.2 : PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmelerinin karşılaştırılması	59
Çizelge 4.3 : CFR-PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin izafi yoğunluğa ve birim hücre şekline bağlı elastisite modüllerinin karşılaştırılması	62
Çizelge 4.4 : CFR-PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmelerinin karşılaştırılması	63
Çizelge 4.5 : Farklı birim hücrelere sahip sandviç paneller için eğme özelliklerinin karşılaştırılması	82
Çizelge 4.6 : Farklı birim hücrelere sahip sandviç kompozit eğme numuneleri için eğme özelliklerinin karşılaştırılması	84

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Hüresel çekirdeğe sahip sandviç yapı.....	2
Şekil 2.1 : Doğada bulunan bazı hüresel malzemeler; a)mantar, b)balsa odunu, c)sünger, d)trabeküler kemik.....	6
Şekil 2.2 : Basma yüklemesi durumunda hüresel malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	7
Şekil 2.3 : Soldan sağa sırasıyla metal, seramik ve polimer malzemeli stokastik köpükler.....	9
Şekil 2.4 : Periyodik dizilime sahip hüresel yapılar.....	10
Şekil 2.5 : Farklı birim hücre topolojileri. a) destek temelli b)iskelet temelli c)levha temelli.....	11
Şekil 2.6 : Açık ve kapalı hücre yapısı.....	12
Şekil 2.7 : Birim hücrelerin, çekme (solda) ve eğilme (sağda) baskın davranışlarının şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.8 : Basma yükü sonrası, eğilme (a) ve çekme (b) baskın davranış için şekil değişimlerinin gösterilmesi.....	14
Şekil 2.9 : Eğilme ve çekme baskın davranış için gerilme şekil değiştirme eğrisi...	14
Şekil 2.10 : Sandviç yapının bölümleri.....	16
Şekil 2.11 : Sandviç yapı elemanlarının eğilme durumunda taşıdığı yükler.....	17
Şekil 2.12 : Sandviç kompozitlerde meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri...	18
Şekil 2.13 : Eklemeli üretim yönteminin temel aşamaları.....	21
Şekil 2.14 : Eriyik yığıma modelleme yönteminin sistem şematığı.....	24
Şekil 3.1 : Kullanılan birim hücre şekilleri (%20 izafi yoğunluk için)	35
Şekil 3.2 : %40 izafi yoğunluğa sahip, altı farklı birim hücreden oluşturulmuş basma numuneleri, a)yatay bal peteği, b)dikey bal peteği, c)kübik, d)yatay truss, e)dikey truss, f)gyroid	36
Şekil 3.3 : %40 izafi yoğunluğa sahip, beş farklı birim hücreden oluşturulmuş sandviç panel tasarımları, a)yatay bal peteği, b)yatay truss, c)gyroid, d)kübik, e)iskelet.....	37
Şekil 3.4 : Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısı.....	38
Şekil 3.5 : Eriyik yığıma modelleme yöntemi ile PLA malzemesinden üretilmiş farklı hücre şekillerine sahip basma numuneleri.	40
Şekil 3.6 : Eriyik yığıma modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş farklı hücre şekillerine sahip sandviç eğme numuneleri; a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) kübik, e) iskelet.....	41
Şekil 3.7 : Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi	43
Şekil 3.8 : Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiş karbon fiber kompozit plakalar	45
Şekil 3.9 : Periyodik hüresel çekirdeğe sahip, karbon fiber plaka takviyeli sandviç kompozit yapılar; a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) kübik, e) iskelet.....	45

Şekil 3.10 : ASTM D638 test standardında yer alan tip1 numunenin boyutlandırması	46
Şekil 3.11 : Shimadzu-AG-X Plus 250 kN test cihazı.....	48
Şekil 3.12 : Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi	49
Şekil 4.1 : PLA filamentı için işleme sıcaklığının basma özelliklerine etkisinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmesi.....	52
Şekil 4.2 : CFR-PLA filamentı için işleme sıcaklığının basma özelliklerine etkisinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmesi.....	53
Şekil 4.3 : %100 izafi yoğunluğa sahip PLA ve CFR-PLA için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	54
Şekil 4.4 : PLA malzemesinden üretilen %20 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	56
Şekil 4.5 : PLA malzemesinden üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	56
Şekil 4.6 : PLA malzemesinden üretilen %60 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	57
Şekil 4.7 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %20 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	60
Şekil 4.8 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	60
Şekil 4.9 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %60 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	61
Şekil 4.10 : PLA malzemesinden üretilen dikey bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	64
Şekil 4.11 : PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	65
Şekil 4.12 : PLA malzemesinden üretilen dikey truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	65
Şekil 4.13 : PLA malzemesinden üretilen yatay truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	66
Şekil 4.14 : PLA malzemesinden üretilen kübik birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi.....	67
Şekil 4.15 : PLA malzemesinden üretilen gyroid birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi.....	68
Şekil 4.16 : CFR-PLA malzemesinden üretilen dikey bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	68
Şekil 4.17 : CFR-PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	69
Şekil 4.18 : CFR-PLA malzemesinden üretilen dikey truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	69
Şekil 4.19 : CFR-PLA malzemesinden üretilen yatay truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	70
Şekil 4.20 : CFR-PLA malzemesinden üretilen gyroid birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	70
Şekil 4.21 : CFR-PLA malzemesinden üretilen kübik birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi	71
Şekil 4.22 : %20 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	72
Şekil 4.23 : %40 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	72

Şekil 4.24 : %60 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	73
Şekil 4.25 : %20 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	73
Şekil 4.26 : %40 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	74
Şekil 4.27 : %60 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	74
Şekil 4.28 : %20 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 4.29 : %40 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 4.30 : %60 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 4.31 : %20 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	76
Şekil 4.32 : %40 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	76
Şekil 4.33 : %60 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	77
Şekil 4.34 : %20 izafi yoğunluklu gyroid birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	77
Şekil 4.35 : %40 izafi yoğunluklu gyroid birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	78
Şekil 4.36 : %60 izafi yoğunluklu gyroid birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	78
Şekil 4.37 : %20 izafi yoğunluklu kübik birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	79
Şekil 4.38 : %40 izafi yoğunluklu kübik birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	79
Şekil 4.39 : %60 izafi yoğunluklu kübik birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi.....	79
Şekil 4.40 : EYM ile üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi	81
Şekil 4.41 : Karbon fiber plakalı sandviç kompozit numuneler için eğme özelliklerinin çekirdek birim hücre şekline bağlı değişimi	83
Şekil 4.42 : Bal peteği birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi.....	85
Şekil 4.43 : Truss birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi	86
Şekil 4.44 : İskelet birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi	86
Şekil 4.45 : Kübik birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi	87
Şekil 4.46 : Gyroid birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi	88

3B EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ HÜCRESEL KAFES YAPILI SANDVIÇ PANELLERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Eklemeli üretim, üç boyutlu model verileri kullanılarak malzemelerin katmanlar halinde üst üste biriktirilmesiyle nesnelere oluşturulduğu üretim yöntemidir. Birçok farklı çeşidi olan eklemeli üretim teknolojileri arasında, dünyada en yaygın kullanıma sahip eklemeli üretim yöntemi Eriyik Yığılma Modelleme olarak bilinmektedir. Eriyik Yığılma Modelleme eklemeli üretim yöntemi, termoplastik malzemenin belirli bir sıcaklıkta eritilmesi ve katmanlar halinde uygun takım yolu boyunca üst üste biriktirilmesiyle modelin oluşturulduğu üç boyutlu eklemeli üretim yöntemi olarak tanımlanabilir.

Modern yapı teknolojileri, toplam ağırlığı azaltmak ve aynı zamanda yeterli dayanıma sahip yapılar üretebilmek için kompozit malzemelerin kullanımına önem vermektedir. Kullanılan bu kompozit malzemelerden biri de sandviç yapılardır. Düşük ağırlıklarından dolayı tercih edilen sandviç yapılar yüksek eğilme dayanımı, titreşim sönümlenme, enerji emilimi ve ısı yalıtımı gibi birçok farklı özelliklerinden dolayı da çeşitli endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Sandviç yapıların imalatında eklemeli üretimin kullanılması çok çeşitli avantajlar sağlamıştır. Bu avantajların en önemlisi, geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zor ya da imkânsız olan periyodik hücresel çekirdeğin yapısını ve geometrisini değiştirerek, geniş bir ölçekte fonksiyonel özelliklerin programlanabilmesine imkân sağlayabilmesidir. Ayrıca periyodik hücresel yapılar, düşük yoğunlukta yüksek rijitlik, yüksek eğilme dayanımı ve yüksek enerji emilimi gibi birçok avantaja sahiptir. Eklemeli üretimin vermiş olduğu geometrik özgürlük neticesinde çok çeşitli hücre malzemeler, sandviç panellerde çekirdek olarak kullanılabilmekte ve istenilen fonksiyonel özellikler hücre şeklinin değiştirilmesiyle sağlanabilmektedir. Eklemeli üretimin sunmuş olduğu bu avantajlardan dolayı, bu tez çalışmasında eklemeli üretim ile üretilen hücresel kafes yapılarının mekanik özellikleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, sandviç yapıya sahip basma ve eğme numunelerinin çekirdek bölümünde, farklı birim hücre şekilleri kullanılmıştır. Sandviç yapıların çekirdek bölümünde kullanılan birim hücre şekilleri yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik, gyroid ve iskelettir. Kullanılan bu farklı hücre şekillerinin her birinin birim hücre boyutları sabit ve 5mm×5mm×5mm değerindedir. Tüm hücresel yapılar, yalnızca hücre kalınlıkları değiştirilerek %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerinde olacak şekilde, bilgisayar destekli tasarım programı yardımıyla tasarlanmıştır. Farklı izafi yoğunluk ve birim hücre şekilleri kullanılarak oluşturulmuş sandviç yapıdaki basma ve eğme numunelerinin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği birim hücre şekilleri tespit edilmiştir. Basma numuneleri, Ultimaker 3 Extended üç boyutlu eklemeli üretim cihazı kullanılarak, polilaktik asit (PLA) ve karbon fiber takviyeli polilaktik asit (CFR-PLA)

malzemesinden üretilmiştir. Eğme numuneleri ise Ultimaker 3 Extended cihazı kullanılarak, PLA malzemesinden üretilmiştir. Ayrıca eklemeli olarak üretilmiş periyodik hücresel çekirdeğe sahip eğme numunelerinin alt ve üst yüzeylerine, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen karbon fiber kompozit plakaların yapıştırılmasıyla sandviç kompozit eğme numuneleri üretilmiştir. Basma numunelerine ASTM C365 standardına ve eğme numunelerine ise ASTM C393/C393M standardına uygun olarak basma ve üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Testler Shimadzu 250kN test cihazında yapılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda basma özelliklerinin birim hücre şekline, izafi yoğunluğa ve malzemeye bağlı değişimleri incelenmiştir. En yüksek basma dayanımı ve elastisite modülünün çekme baskın deformasyon davranışı gösteren dikey truss, dikey bal peteği ve kübik birim hücrelerine sahip numunelerde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca izafi yoğunluğu arttırmak mekanik özellikleri belirli ölçüde arttırmıştır. Eğme özelliklerinin ise birim hücre şekline ve karbon fiber plaka takviyesine bağlı değişimi incelenmiştir. Alt ve üst yüzeylere takviye edilen karbon fiber kompozit plakaların eğme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve enerji emme kabiliyetini önemli ölçüde arttırdığı bu çalışma ile ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli Üretim, Eriyik Yığılma Modelleme, Periyodik Hücresel Yapılar, Kafes Yapıları, Sandviç Kompozit, Mekanik Özellikler.

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF SANDWICH PANELS WITH LATTICE STRUCTURE PRODUCED BY 3D ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

SUMMARY

Additive manufacturing is a production method in which 3D model data is used to produce objects by depositing the material layer by layer. Fused deposition modeling is the most widely used method compared to other various additive manufacturing technologies. Fused deposition modeling as a 3D additive manufacturing method is defined as layer-by-layer deposition of thermoplastic material along the designated path to create an object after melting it at a set temperature.

The usage of composite materials is considered important to manufacture structures with sufficient strength and reduced total weight in modern structures. Sandwich composites are one of the materials used by industry. Various industries use sandwich composites to benefit from their high flexural strength, vibration damping, energy absorption and heat insulation properties in addition to their light weight. The use of additive manufacturing for production of sandwich structures provides a wide variety of advantages. Additive manufacturing not only provides an option to manufacture periodic lattice structures, which are difficult or impossible to produce by conventional methods, but also allows programming of functional features on a large scale by adjusting the structure and geometry. Furthermore, periodic lattice structures have many additional advantages such as high stiffness, high flexural strength and high-energy absorption at low density. Because of the geometrical freedom given by additive manufacturing, a wide variety of lattice materials can be used as the core in sandwich panels and the desired properties can be achieved by changing the cell geometry. Due to these advantages, the mechanical properties of lattice structures produced by additive manufacturing were investigated in this thesis.

In this study, different unit cell geometries were used as the core structure in the sandwich compression and flexural test samples. The unit cell shapes used in the core section of sandwich samples are horizontal honeycomb, vertical honeycomb, horizontal truss, vertical truss, cubic, gyroid and skeleton. The dimensions of every unit cell was selected as 5mm × 5mm. All lattice structures were designed with the help of a computer-aided design program to have relative densities of 20%, 40% and 60%, by only adjusting the wall thickness of cellular structures. The mechanical properties of the compression and flexural test samples with different relative densities and unit cell shapes were compared and best performing unit cell shapes were determined. Compression test samples were produced from polylactic acid (PLA) and carbon fiber reinforced polylactic acid (CFR-PLA) using the Ultimaker 3 Extended which is a three-dimensional additive manufacturing device. However, flexural test samples were produced only from PLA material using same device. Next, carbon fiber composite plates were manufactured by vacuum infusion method and then sandwich composite flexural test specimens were obtained by glueing the carbon fiber composite

plates to the lower and upper surfaces of lattice core structures produced by additive manufacturing. Compression and flexural tests were carried out on Shimadzu universal testing machine with the capacity of 250kN in accordance with ASTM C365 and ASTM C393/C393M, respectively.

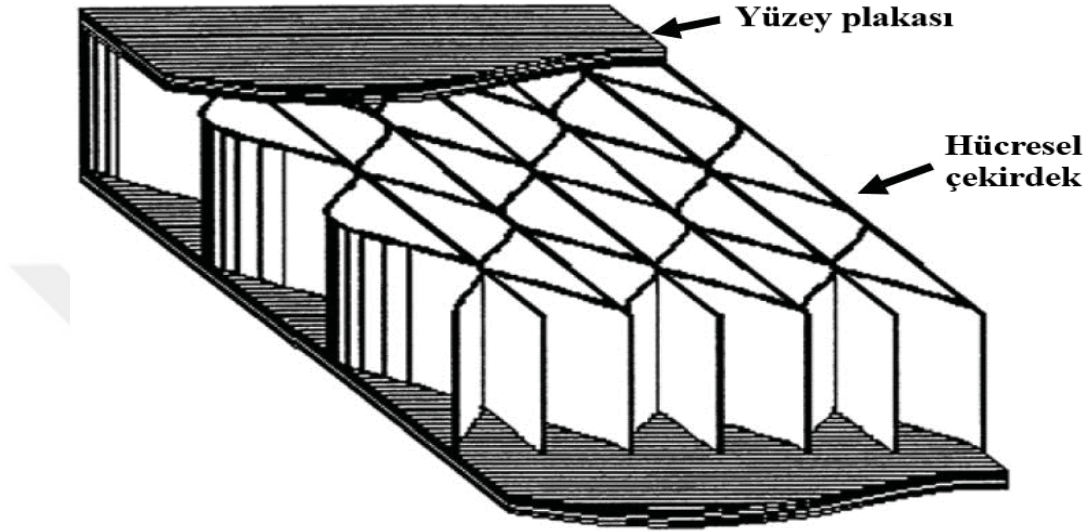
In this thesis, the changes of compression properties were investigated depending on the shape of the unit cell, relative density and material. The highest compressive strength and modulus of elasticity were observed in samples with vertical truss, vertical honeycomb and cubic unit cells, which exhibit stretching-dominant deformation behavior. In addition, increasing the relative density increased the mechanical properties to a certain extent. The changes of the flexural properties of the samples were investigated depending on the unit cell geometry and carbon fiber plate reinforcement. This study found that carbon fiber reinforced composite plates significantly increased flexural strength, modulus of elasticity, toughness and energy absorption.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Periodic Cellular Structures, Lattice Structures, Sandwich Composite, Mechanical Properties.

1. GİRİŞ

Düşük ağırlığa sahip sandviç yapılar sahip oldukları yüksek eğilme dayanımı, titreşim sönümleme, enerji emilimi, ısı yalıtımı gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedirler [1,2]. Tarihte sandviç yapı fikri ilk olarak 19. yüzyılda Duleau ve Fairbairn tarafından ortaya atılmıştır [3]. Bu fikir 20. yüzyılın ortalarına kadar çok fazla araştırılma imkânı bulmamıştır. 2. Dünya Savaşı sırasında Mosquito isimli bombardıman uçağının çeşitli parçalarında sandviç kompozitlerin kullanılmasıyla beraber, daha sonraki süreçte sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması hakkında daha çok çalışma yapılmıştır [3]. İlk zamanlarda sandviç yapılar havacılık alanında kullanılırken, ilerleyen süreçte otomotiv, biyomedikal, rüzgâr türbini, denizcilik, inşaat gibi birçok endüstride yaygın bir şekilde kullanılmış ve halâ kullanılmaktadır. Sandviç yapılar, alt ve üst yüzeyde bulunan mukavemeti yüksek plakalar ile orta kısımda bulunan düşük yoğunluğa sahip çekirdek diye adlandırılan parçaların birleşmesinden meydana gelir. Şekil 1.1'de hücreli çekirdeğe sahip sandviç yapı gösterilmektedir. Yüzeydeki plakalar çoğunlukla eğme yüklerini taşıırken, çekirdek yapı enine kesme yüklerini iletir [1]. Sandviç yapıda, yüzey plakalarının eğme momentinden kaynaklanan çekme ve basma yüklerini taşıyabilecek şekilde yeterli mukavemete sahip olması istenir. Ayrıca çekirdeğin kayma gerilmelerine dayanabilecek şekilde yeterli rijitliğe ve mukavemete sahip olması da sandviç yapıda arzu edilen bir diğer özelliktir. Çekirdek bölümü sandviç yapıya sağlamış olduğu kesme dayanımının yanı sıra bükülme ve burkulma direncini de arttırarak [4,5], yüzeydeki plakalarla küçük bir ağırlık artışı ile tutunmayı sağlar [6]. Sandviç yapıların mekanik uygulamalarda tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden biri de sahip olduğu yüksek özgül dayanım değerleridir. Özgül dayanım birim kütle için dayanımı olarak tanımlanabilir, yani aynı ağırlığa sahip düz katı bir plaka ile hücreli çekirdeğe sahip sandviç panelin eğme dayanımları kıyaslanacak olursa sandviç panel, düz katı bir plakaya kıyasla daha yüksek özgül dayanım değerlerine sahip olabilmektedir [6].

Sandviç yapılarda çekirdeğin topolojik ve boyutsal özellikleri, yapının genel davranışı üzerinde önemli bir rol oynar ve birçok durumda yapının tüm karakteristiğini yönetebilir. Bundan dolayı son zamanlarda yapılan araştırmaların büyük bir bölümü, sandviç yapılarda kullanılan çekirdek topolojilerinin değişiminin, statik ve dinamik yükleme durumunda yapının mekanik özelliklerini ne şekilde etkilediğinin araştırılmasına yöneliktir.



Şekil 1.1 : Hücresel çekirdeğe sahip sandviç yapı [7]

Hücresel malzemeler, istenilen özelliği belirgin hale getirmek için kasıtlı olarak boşluklara sahip malzemelerdir [5]. Hücresel malzemeler sahip oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı, ısı yalıtımı, ısı transfer kontrolü, gelişmiş enerji yutma kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı sıkça tercih edilmektedirler [8]. Tüm bu sahip oldukları özelliklerinden dolayı hücresel malzemeler, biyomedikal implantlar [9], filtreler [10], ısı değiştiriciler [11] ve düşük ağırlıklı diğer yapılarda [12] tercih edilmekte ve kullanılmaktadır.

Sandviç panellerde çekirdek yapısı farklı malzemelerden oluşabilir. Sandviç panellerin çekirdek kısmında kullanılan ilk hücresel malzemeler, köpükler olarak bilinmektedir [13]. Köpük malzemeleri rastgele sıralanmış gözenekli yapılara sahip olup homojen olmayan malzeme özellikleri göstermektedir. Kullanılan başlıca köpük malzemeleri, metal, plastik ve seramik olarak sıralanabilir. Plastik köpükler daha çok ısı yalıtım uygulamalarında ve sandviç panellerin çekirdek bölümünde kullanılırken, metal köpükler dayanımın önemli olduğu uygulamalarda sıkça tercih edilmektedirler. Kullanılan bir diğer hücresel yapı ise periyodik hücresel malzemelerdir. Periyodik hücresel malzemeler, homojen ve gelişmiş mekanik özelliklere sahiptir. Hücresel

malzemelerde, boşluklar periyodik olarak düzenli bir şekilde oluşturulduğunda, hücre malzemeler kafes yapılı malzeme adını almaktadır. Periyodik hücre malzemeler, bal peteği birim hücre yapısında olduğu gibi iki boyutlu ya da kübik birim hücre yapısında olduğu gibi üç boyutlu geometrilere sahip olabilir. Periyodik iki boyutlu hücre malzemeler x-y düzlemi boyunca tekrar eden yüzey topografyasına sahiptir ve z düzleminde ekstrüde edilir [14]. Üç boyutlu hücre malzemeler ise x-y, y-z, x-z düzlemlerinde birbirini farklı tekrar eden yüzey topografyasına sahiptir [15]. Sandviç panellerde, çekirdek olarak kullanılan birçok farklı hücre topolojisi mevcuttur. Hücre çekirdeğe sahip sandviç panelin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler; hücre topolojisi, geometri(hücre boyutu), kullanılan malzeme, izafi yoğunluk, işleme sıcaklığı şeklinde sıralanabilir.

Yakın zamana kadar karmaşık hücre geometrilerinin geleneksel üretim teknikleriyle üretimi büyük bir zorluktu ve istenilen hücre boyutu küçüldükçe üretimdeki zorluklar artmaktaydı. Eklemeli üretimdeki son gelişmeler ile birlikte istenilen hücre topolojileri, büyük bir doğrulukla ve çok küçük boyutlarda bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak üretilmeye başlandı. Başlangıçta sandviç yapılar temel olarak havacılık uygulamaları için kullanılmıştır. Daha sonra eklemeli üretim teknolojilerinin gelişmesiyle ve yeni çekirdek topolojilerinin ortaya çıkmasıyla, çok farklı işleve sahip özellikler tanınmış ve böylece hücre çekirdeğe sahip sandviç yapıları diğer sektörler içinde çekici hale gelmiştir. Sandviç yapıların imalatında eklemeli üretimin kullanılması çok çeşitli avantajlar sağlamıştır. Bu avantajların en önemlisi, hücre çekirdeğin yapısını ve geometrisini değiştirerek, geniş bir ölçekte fonksiyonel özelliklerin programlanabilmesine imkân sağlayabilmesidir[16]. Eklemeli üretimin vermiş olduğu geometrik özgürlük neticesinde çok çeşitli hücre malzemeler, sandviç panellerde çekirdek olarak kullanılabilmekte ve istenilen fonksiyonel özellikler hücre şeklinin değiştirilmesiyle sağlanabilmektedir. Eklemeli üretimin sunmuş olduğu bu avantajlardan dolayı, eklemeli üretim ile üretilen hücre kafes yapılarının mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik olarak bu tez çalışması yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının öncelikli hedefleri şunlardır;

- Mevcut eklemeli üretim yöntemlerinin araştırılması ve karşılaştırılması.

- Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) yöntemi kullanılarak, polilaktik asit (PLA) ve karbon fiber takviyeli polilaktik asit (CFR-PLA) malzemelerinden farklı işleme sıcaklıklarında çekme numunelerinin üretilmesi. Üretilen numunelere yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerine göre PLA ve CFR-PLA malzemeleri için en uygun işleme sıcaklığı aralıklarının belirlenmesi.
- EYM yöntemi kullanılarak üretilen basma numunelerine yapılan basma testleri sonucunda, aynı boyuta ve kütleye sahip farklı birim hücre şekillerinin kullanılmasıyla oluşturulmuş numuneler için basma özellikleri ve deformasyon tiplerinin birim hücre şekline bağlı değişiminin incelenmesi.
- Birim hücre boyutunu değiştirmeksizin, sadece birim hücre kalınlığını değiştirerek, farklı izafi yoğunluk değerlerinde üretilen basma numunelerine yapılan basma testi sonucunda, farklı izafi yoğunluğa sahip numunelerin gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi. İzafi yoğunluğun mekanik özellikler üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- Ticari bir markaya ait, CFR-PLA ve PLA filamentlerin basma özelliklerinin karşılaştırılması.
- EYM yöntemi kullanılarak üretilmiş, farklı birim hücre şekillerine sahip eğme numunelerinin mekanik özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişiminin incelenmesi.
- Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen karbon fiber plakalar ile eklemeli olarak üretilmiş periyodik hücresel yapıların yapılandırılmasıyla oluşturulmuş kompozit sandviç yapıların, eğme dayanımı ve elastisite modülleri gibi eğme özelliklerinin belirlenmesi. Elde edilen sonuçlara göre, hücre şeklinin eğme özelliklerine etkisinin incelenmesi.

1.2 Tezin Taslağı

Tezin amacına ulaşabilmesi için oluşturulan plan aşağıdaki gibidir.

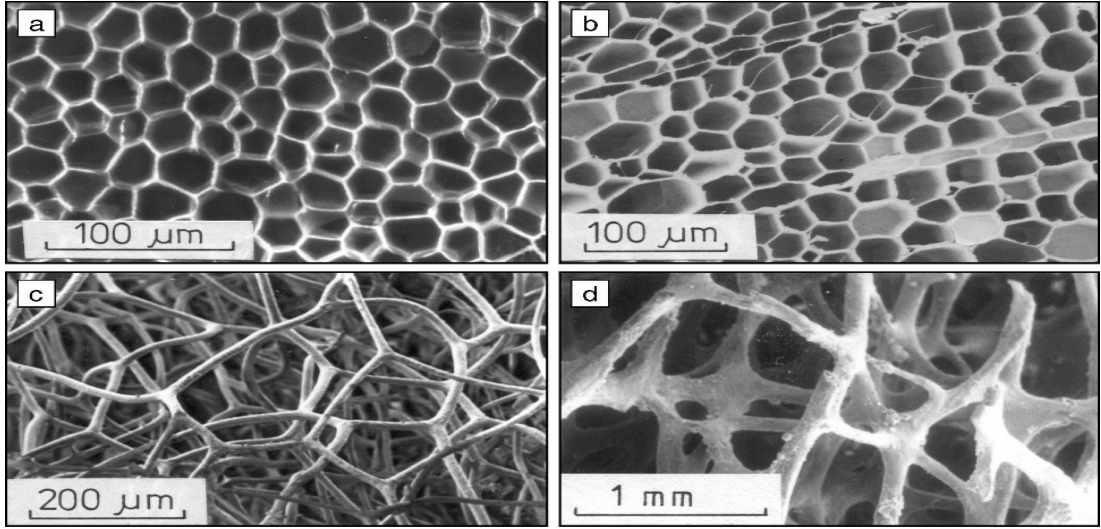
- Eklemeli üretim, hücresel malzemeler ve sandviç yapılara ait literatürde bulunan kaynakların gözden geçirilmesi.

- Kullanılacak yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik, iskelet ve gyroid birim hücre Şekillerinin, 5mm×5mm×5mm boyutunda bilgisayar destekli çizim programı ile tasarlanması.
- Aynı boyuta sahip altı farklı birim hücre Şeklini kullanılarak, üç farklı izafi yoğunlukta, toplam 18 adet basma numunesinin bilgisayar destekli çizim programı ile tasarlanması.
- Eğme numunelerinin çekirdek bölümünde kullanılmak üzere; beş farklı birim hücre Şekline sahip yapıların, %40 izafi yoğunluğunda, 120mm×15mm×16.5mm boyutunda olacak Şekilde bilgisayar destekli çizim programı ile tasarlanması.
- PLA ve CFR-PLA filamentleri için; EYM eklemeli üretim yönteminde en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği işleme parametrelerinin belirlenmesi.
- PLA ve CFR-PLA malzemeleri kullanılarak EYM yöntemi ile basma numunelerinin retimesi.
- EYM yöntemi kullanılarak %40 izafi yoğunluk değerine sahip sandviç panellerin PLA malzemesi ile retilmesi.
- Vakum infüzyon yöntemi kullanarak üretilen karbon fiber kompozit plakaların, EYM eklemeli üretim yöntemi ile üretilen sandviç panellerin alt ve üst yüzeylerine yapıştırılmasıyla sandviç kompozit eğme numunelerinin retilmesi. Sandviç panel ile sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması ve sandviç panellere yapılan karbon fiber plaka katkısının eğme dayanımı ve eğilme rijitliği üzerine etkisinin incelenmesi.
- Üretilen ekme, basma ve eğme numunelerinin mekanik testlerinin yapılması.
- Yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve yorumlanması.

2. LİTERATÜRÜN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

2.1 Hücresel Malzemeler

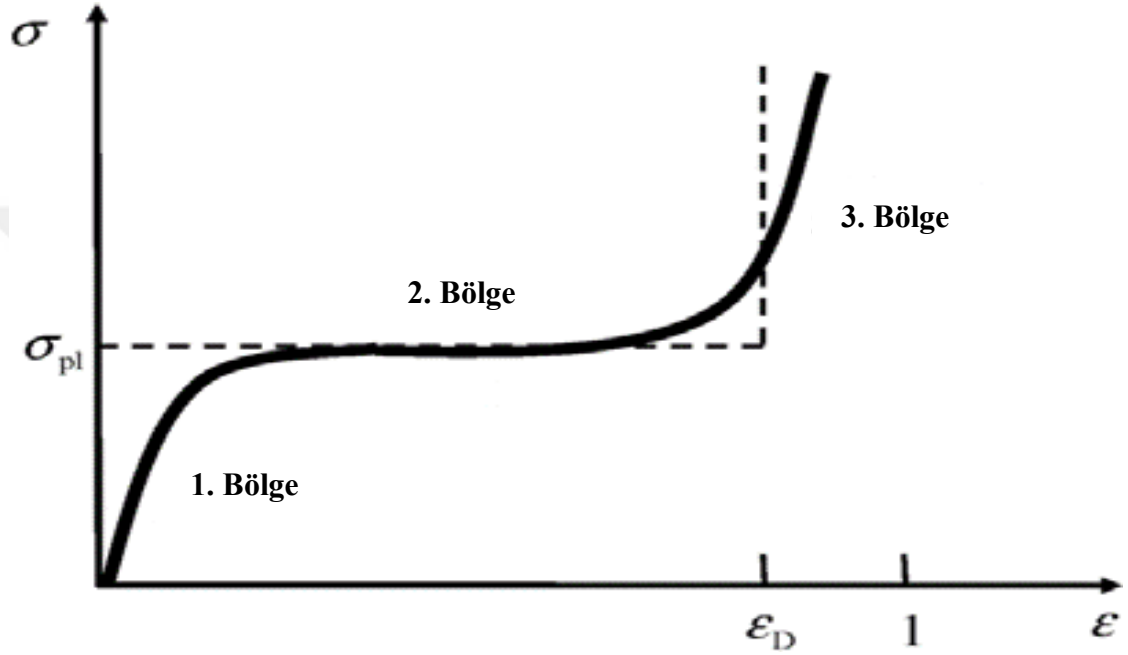
Hücresel malzemeler, gözenekli veya boşluklu malzemeler olarak düşünülebilir. İnsan yapımı veya doğal olarak meydana gelen çeşitli hücresel malzemeler vardır. Şekil 2.1’de gösterilen, mantar, balsa odunu, sünger, trabeküler kemik gibi yapılar doğal hücresel malzemelere örnek olarak verilebilir. Hücresel malzemelerin bir diğer ismi de meta-malzemedir. Hücresel malzemeler ilginç mekanik ve fiziksel özelliklerin kombinasyonlarına sahiptirler. Hücresel malzemeler doğada yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa ihtiyaç duyulan uygulamalarda karşımıza sıkça çıkmaktadırlar. Örneğin; kuşların yorulmadan çok uzun mesafelere uçabilmeleri için olabildiğince hafif olmaları gerekmektedir, bunu sağlayacak şekilde kuşların kemikleri hava ceplerine sahip içi boş bir yapıdadır.



Şekil 2.1 : Doğada bulunan bazı hücresel malzemeler; a) mantar, b) balsa odunu, c) sünger, d) trabeküler kemik [17]

Hücresel malzemeler sahip oldukları yüksek darbe dayanımı, enerji yutma kabiliyeti, titreşim sönümlenme, termal yalıtım, akustik ses yalıtımı gibi özelliklerinden ve yüksek rijitliklerine ek olarak düşük ağırlığa sahip olmalarından dolayı; otomotiv, havacılık, ulaştırma ve biyomedikal gibi birçok farklı endüstride geniş uygulama alanına sahiptirler [18,19,20,21,22]. Hücresel malzemeler özellikle patlama ve çarpışmadan

etkilenecek uygulama alanlarında, yüksek darbe ve enerji sönümlenme özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Bunun nedeni, plastik sıkıştırma sırasında plato bölgesi diye adlandırılan bölgede yüksek bir genleme yoğunlaşmasına sahip olmalarından ya da başka bir ifadeyle gerilmenin sabit kaldığı süre boyunca yoğunlaşmış şekil değişiminin gerçekleşmesinden kaynaklıdır [23]. Şekil 2.2’de basma yüklemesi esnasında hücre malzemelere ait gerilme birim şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir. Bu eğri üzerinde, σ_{pl} plato gerilmesini, ϵ_D yoğunlaşmış birim şekil değişimini göstermektedir.



Şekil 2.2 : Basma yüklemesi durumunda hücre malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [24]

Şekil 2.2, basma yüklemesi durumunda hücre malzemelerde meydana gelen gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin üç farklı bölgeye ayrılmış halini göstermektedir. Şekilde gösterilen kesikli çizgi, ilk olarak Reid ve Peng tarafından ele alınan mükemmel plastik kilitleme modelidir (RPPL) [25]. Mükemmel plastik kilitleme modeline göre, birinci bölgedeki davranış katı bir malzemenin şekil değiştirme davranışı olarak düşünülebilir. Birinci bölgede artan gerilmeye karşılık malzeme belli bir oranda şekil değiştirmektedir. İkinci bölgede hücre malzeme, sabit plato gerilmesi (σ_{pl}) ile mükemmel bir plastik olarak ele alınır ve bu yoğunlaşmış bölge yoğunlaşmış birim şekil değişimi (ϵ_D) ile sona erer. Üçüncü bölge ise tekrar katı malzeme davranışının sergilendiği bölge olarak basitleştirilmiştir.

Birinci bölgede gerçekleşen şekil değişimi elastiktir yani tersine çevrilebilir ya da başka bir ifade ile uygulanan gerilmenin geri çekilmesi durumunda hücre yapının

eski halini alabileceği şekildedir. Hücresel yapı içerisinde yer alan bazı hücreler birinci bölgenin sonunda çökerler. Bu bölgede plastik şekil değişimi, elastik burkulma ya da oluşan çatlaklar çökmenin sebebi olabilir. İkinci bölgede gerilim değeri uzunca bir süre sabit kalırken şekil değişimi devam eder. Bu bölgede sabit olan gerilim değeri plato gerilmesi(σ_{pl}) olarak adlandırılır. Tüm hücreler tamamen çökünceye kadar plastik ve burkulma çökmesi sürekli olarak gerçekleşir. İkinci bölge sonunda gerçekleşen şekil değişiminin geri dönüşümü yoktur, yani plastik şekil değişimi gerçekleşmiştir. Bu bölgede gerçekleşen plastik sıkışma esnasında, gerilme şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan yapının enerji depolama kabiliyetini gösterir. Bu durum hücresel malzemelerin sahip oldukları yüksek enerji emilimi özelliğini açıklamaktadır. Üçüncü bölgede ise hücre duvarları birbiri üzerinde ezilir ve bu durumda gerilme yaklaşık olarak dik bir şekilde hızlıca artmaktadır.

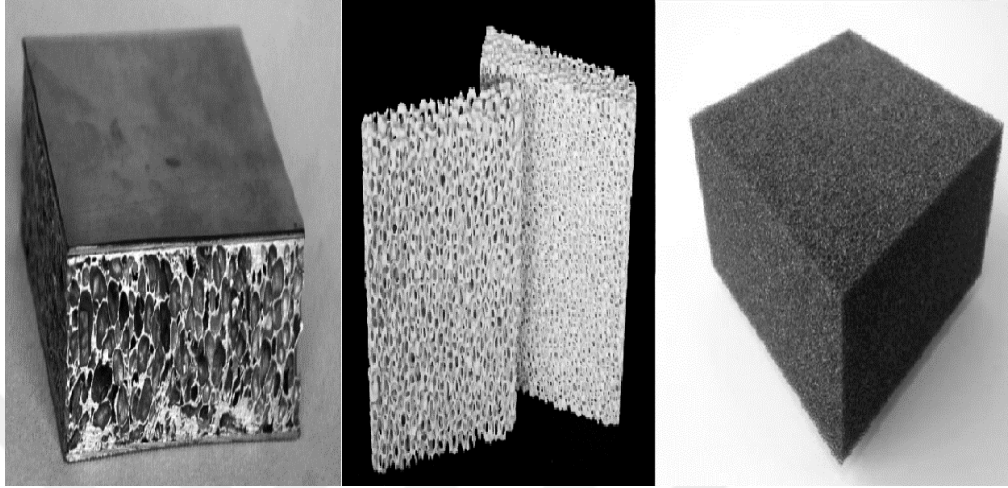
Wadley, hücresel yapı malzemelerin geometrik karakteristiklerini göz önüne alarak bu malzemeleri stokastik ve periyodik olarak iki ana kategoriye ayırmıştır [26]. Periyodik hücresel malzemeler düzenli kafes yapılarından dolayı köpüklere kıyasla daha homojen özellikler göstermektedirler. Periyodik hücresel malzemeler, birim hücre modellemesi ve homojenizasyon teorisi kullanılarak mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesinden dolayı mühendislik uygulamalarına rasyonel olarak uyarlanabilirler [27]. Hücresel malzemelerde, hücrelerin şekli önemli bir role sahiptir. Hücresel malzemelerin mekanik etkilere cevapları, tek hücre yapısı, konfigürasyon (doku yapısı) ve matris özellikleriyle belirlenir. Bu bağlamda çekirdek hücrelerini optimize etmek (iyileştirmek) için farklı çalışmalar yapılmıştır. Gibson vd. [28], altıgen bal peteğinin davranışını incelemiş ve hücre çeperi kalınlığı ile izafi yoğunluğun, gerilim birim şekil değiştirme tepkisi üzerindeki etkilerinden bahsetmişlerdir.

Bu bölümün devamında, stokastik köpükler, periyodik hücresel malzemeler, açık ve kapalı hücre kavramları, eğilme ve çekme baskın davranış, izafi yoğunluk ve farklı hücre topolojilerinden bahsedilmiştir.

2.1.1 Stokastik Köpükler

Kelime anlamı olarak tesadüfi veya rastlantısal anlamında kullanılan stokastik terimi, köpük malzemeleri için sahip olunan düzensiz makro yapıyı tanımlamak amacıyla kullanılır. Şekil 2.3'de metal, seramik ve polimer malzemeli stokastik köpüklere ait

örnekler gösterilmiştir. Hücresel malzemeler hücre yapılarının düzenli ve düzensiz olması açısından; stokastik veya periyodik hücresel malzemeler olarak iki temel gruba ayrılmıştır. Düzensiz hücresel yapıya sahip stokastik köpükler metal, seramik ve polimer malzemeler kullanılarak oluşturulabilir.



Şekil 2.3 : Soldan sağa sırasıyla metal, seramik ve polimer malzemeli stokastik köpükler

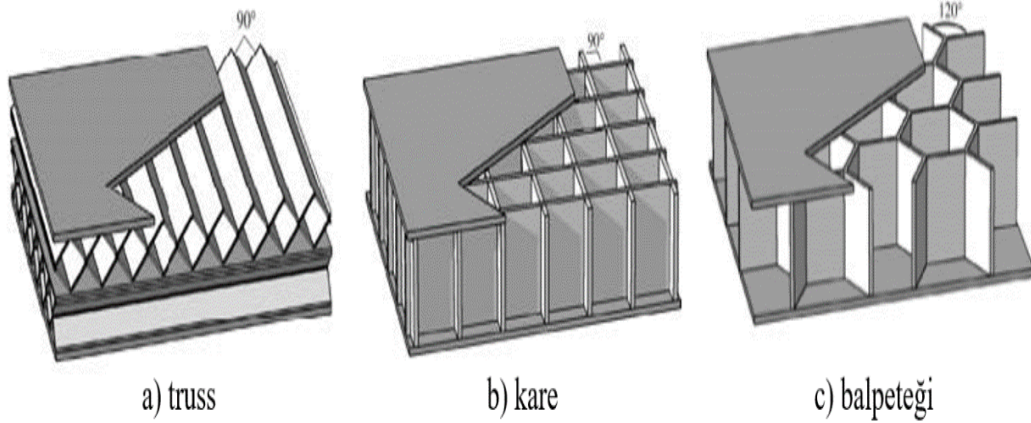
Metal köpükler hakkında ilk çalışma 1948 yılında Sosnik tarafından yapılmıştır. Sosnik çalışmasında alüminyum 'un içinde cıva buharlaştırarak ilk metalik köpük malzemesini üretmiştir. Daha sonra aynı yöntemi kullanan Elliot, metalik köpük malzemesi üretmiş ve süreç ilerleyerek gelişmeye devam etmiştir [29]. Metal köpükler sahip oldukları, düşük ağırlıklarına oranla yüksek özgül mukavemet değerleri, darbe sönümleme özellikleri, korozyon dirençleri, yüksek ergime sıcaklıkları, hammadde maliyeti gibi özelliklerinden dolayı; otomotiv, savunma sanayi, biyomedikal ve yapı sektörü gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan metal köpük malzemesi alüminyum olmasına rağmen, titanyum, magnezyum, nikel gibi çeşitli metallerde köpük üretiminde sıkça kullanılmaktadır.

Günlük hayatta polimerik köpükler, ısı veya akustik yalıtım malzemelerinde, sıcak içecek bardaklarında, otomobillerin hava yastıklarında ve birçok alanda sıkça karşımıza çıkmaktadır. En çok kullanılan polimerik köpük malzemelerine, polietilen ve poliüretan örnek verilebilir. Seramik köpük malzemeleri ise döküm filtreleri, katalitik reaktörler, güneş enerji jeneratörleri, ısı yalıtım malzemeleri gibi uygulama alanlarında sıkça kullanılmaktadır [30]. Mekanik özelliklerin daha fazla önem kazandığı yük taşıma uygulamalarında, kullanılan köpüklerin malzemesi çok dikkatli seçilmelidir. Polimer köpükler yetersiz mukavemete sahip iken, seramik köpükler ise

oldukça kırılğan yapıdır. Bu yüzden kuvvetin etkili olduğu uygulamalarda metalik köpükler, yüksek dayanım değerlerinden dolayı yük taşıma uygulamaları için uygundurlar [29].

2.1.2 Periyodik Hücresel Malzemeler

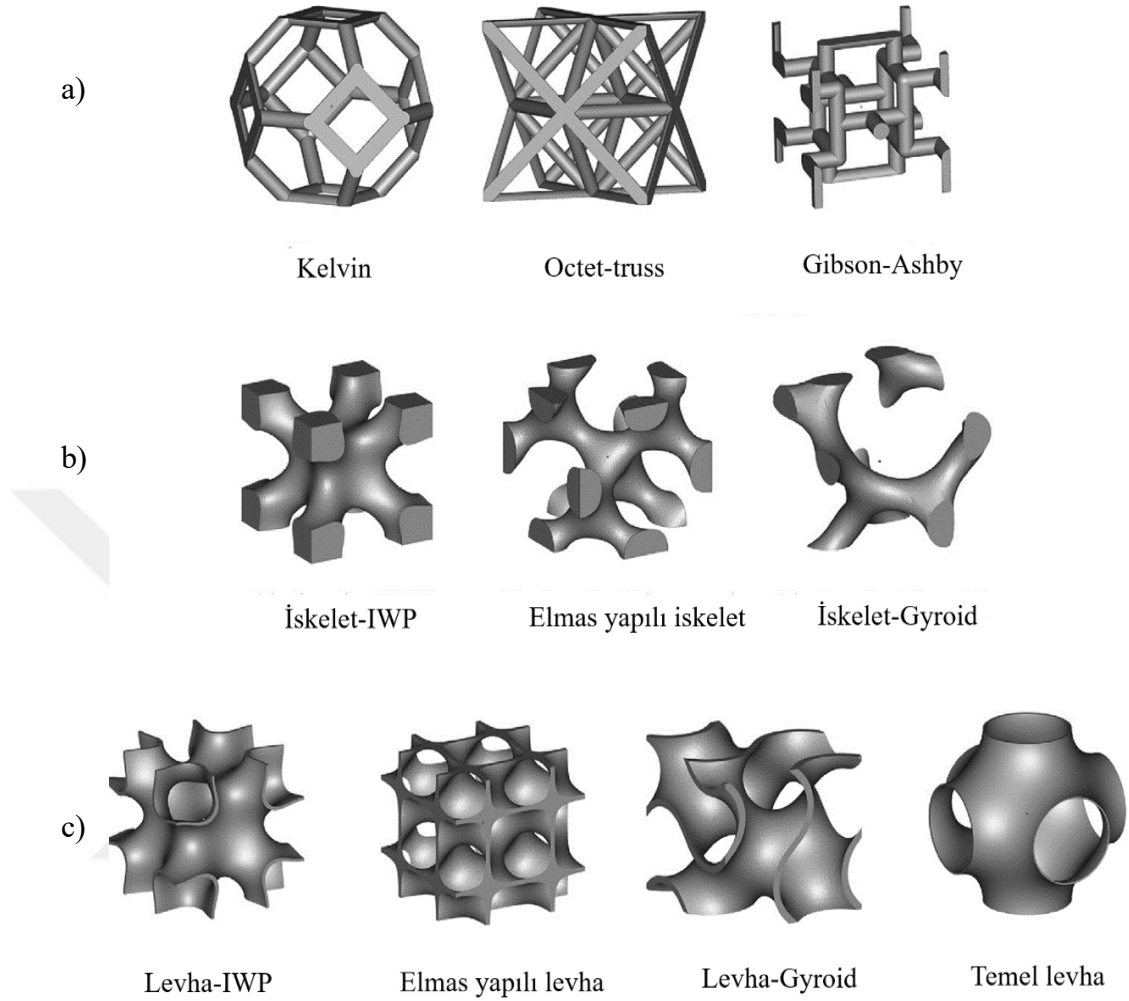
Periyodik hücresel malzemeler ya da başka bir ifadeyle kafes yapılı malzemeler, boşlukların kasıtlı olarak periyodik bir şekilde üst üste veya yan yana oluşturulduğu malzemelerdir[31] . Şekil 2.4’de periyodik hücre dizilimine sahip hücresel yapı gösterilmektedir. Kafes yapıları bal peteği, truss vb. hücresel yapılarında olduğu gibi iki boyutlu ya da kelvin, gyroid vb. hücre yapılarında olduğu gibi üç boyutlu şekilde olabilir. İki boyutlu kafes yapıları düzlemsel geometriye sahip iken üç boyutlu kafes yapıları uzaysal geometriye sahiptirler.



Şekil 2.4 : Periyodik dizilime sahip hücresel yapılar [32]

Periyodik hücresel malzemelerin köpük malzemelere göre temel avantajı, hücrelerin sıralı ve düzenli bir şekilde düzenlenebilmesinden dolayı daha homojen özelliklere sahip olmasıdır. Ayrıca kontrol edilebilen hücre topolojisinden dolayı malzemenin davranışı öngörülebilme ve çalışma şartlarına uygun malzemelerin üretilmesi mümkün hale gelmektedir. Periyodik hücresel malzemelerde kullanılan birim hücre topolojileri, Şekil 2.5’de gösterildiği gibi; destek, iskelet ve levha temelli olmak üzere üç farklı kategoride sınıflandırılabilir. Destek temelli hücresel topolojilere; kelvin, octet-truss, gibson-ashby, iskelet temelli hücresel topolojilere; iskelet-1wp, elmas yapılı iskelet, gyroid ve levha temelli hücresel topolojilere ise levha-1wp, elmas yapılı levha, gyroid ve temel levha örnek olarak verilmiştir. Ayrıca periyodik hücresel malzemeler, kullanılan malzemenin cinsine göre metal, polimer, seramik malzemeli

olarak ya da açık ve kapalı hücre yapısına sahip olmalarına göre de çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadırlar.



Şekil 2.5 : Farklı birim hücre topolojileri. a)destek temelli b)iskelet temelli c)levha temelli [33]

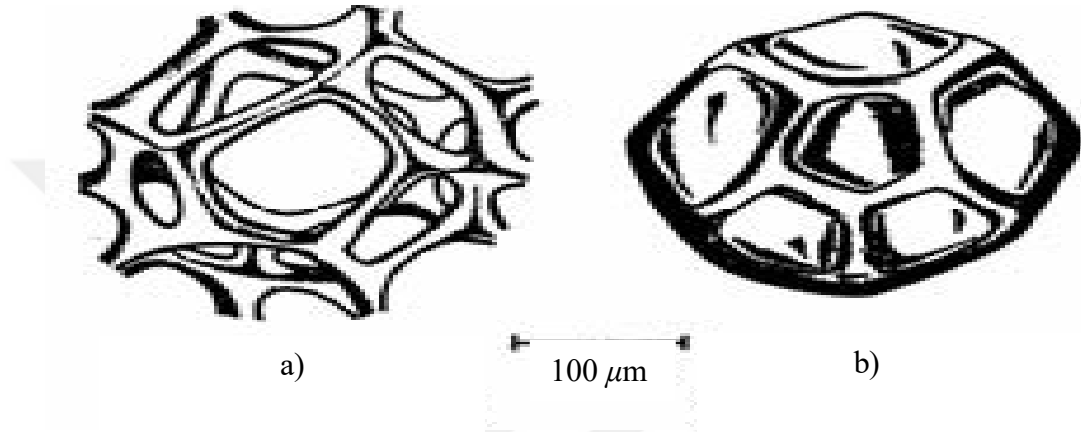
Hücre malzemelerin özelliklerini etkileyen parametreler genel olarak üç ana başlığa ayrılabilir [34]. Bu değişkenler;

- Hücre malzemenin üretildiği hammadde,
- Hücre topolojisi ve şekli,
- Hücre yapının izafi yoğunluğudur (ρ^*/ρ_s). Burada ρ^* hücre malzemenin yoğunluğu iken ρ_s hücre malzemenin tamamen dolu durumdaki yoğunluğudur.

2.1.3 Açık ve Kapalı Hücre Yapısı

Köpükler ve periyodik hücre malzemeler, hücreler arasında bağlantı olup olmamasına göre açık ve kapalı hücre yapıları olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Hücresel malzemelerin mekanik özellikleri, sahip oldukları açık ve kapalı hücre yapısıyla da doğrudan ilişkilidir. Eğer gözeneklerin birbirleriyle bağlantıları yoksa yani tamamen birbirlerinden izole bir şekilde ayrılıyorsa bu hücresel yapılar kapalı hücre yapısına sahip hücresel malzemeler olarak adlandırılır. Eğer gözenekler birbirleriyle bağlantılı yani hücreler arasında boşluklar var ise açık hücre yapısına sahip hücresel malzemeler olarak adlandırılır [35]. Birçok hücresel malzeme ise hem açık hem de kapalı hücre yapılarına birlikte sahiptir. Şekil 2.6’ da açık ve kapalı hücre yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Hücre yapıları; a)Açık hücreli, b)Kapalı hücreli [39]

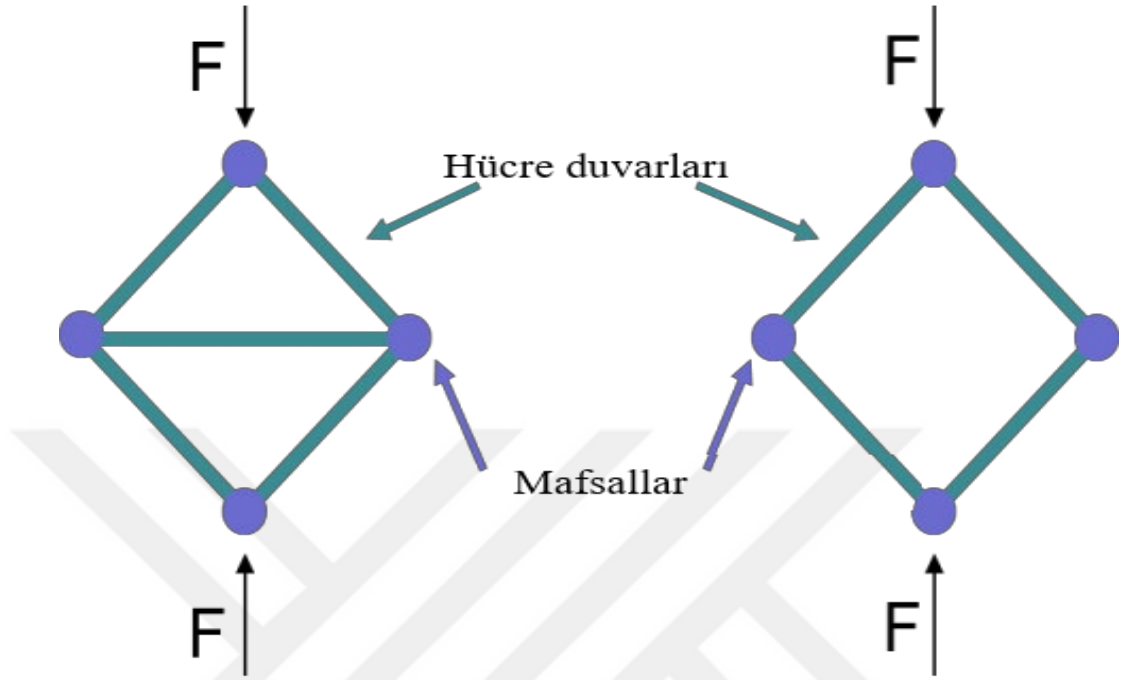
2.1.4 Çekme ve Eğilme Baskın Davranış

Hücresel malzemelere yük uygulanması durumunda, hücresel malzemeler hücre duvarlarının göstermiş olduğu şekil değişimine göre eğilme baskın veya çekme baskın deformasyon davranışı gösterirler [36]. Burada yapının göstereceği deformasyon tipi hücre şekli ve topolojisiyle alakalıdır. Şekil 2.7’de her iki durum için temsili bir birim hücre konfigürasyonu gösterilmektedir.

Şekil 2.7’de gösterilen durum için, hücre duvarlarının birbirlerine kaynaklı bir bağlantıda olduğu gibi bağlandığı düşünülebilir ve bu yüzden mafsalların serbestçe dönmesi engellenmiştir. Şekil 2.7’de solda gösterilen durum, çekme baskın davranışı ve sağda gösterilen durum ise eğilme baskın davranışı belirtir niteliktedir.

Çekme baskın davranışı gösteren durum için, F yükü Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, alttan ve üstten dikey bir biçimde basma yükü olarak uygulandığında, çapraz hücre duvarları aksenal basma yükünün etkisiyle şekil değiştirirken, yatay hücre duvarı çekme yükünün etkisiyle şekil değiştirir. Bu durumda meydana gelen deformasyon Şekil 2.8’de (b) durumunda, basma yüküne maruz kalan birim hücre için açıkça

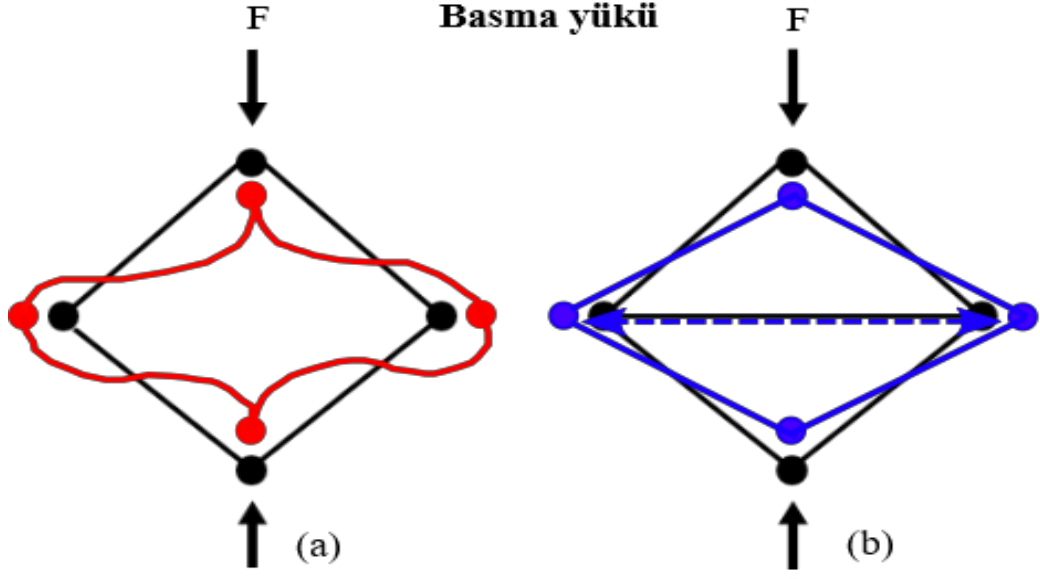
gösterilmektedir. Çekme baskın davranış için malzemenin dayanım değeri aşıldığında, hücre duvarları ani bir biçimde kırılarak ya da burularak (elastik ya da plastik) çökerler [37].



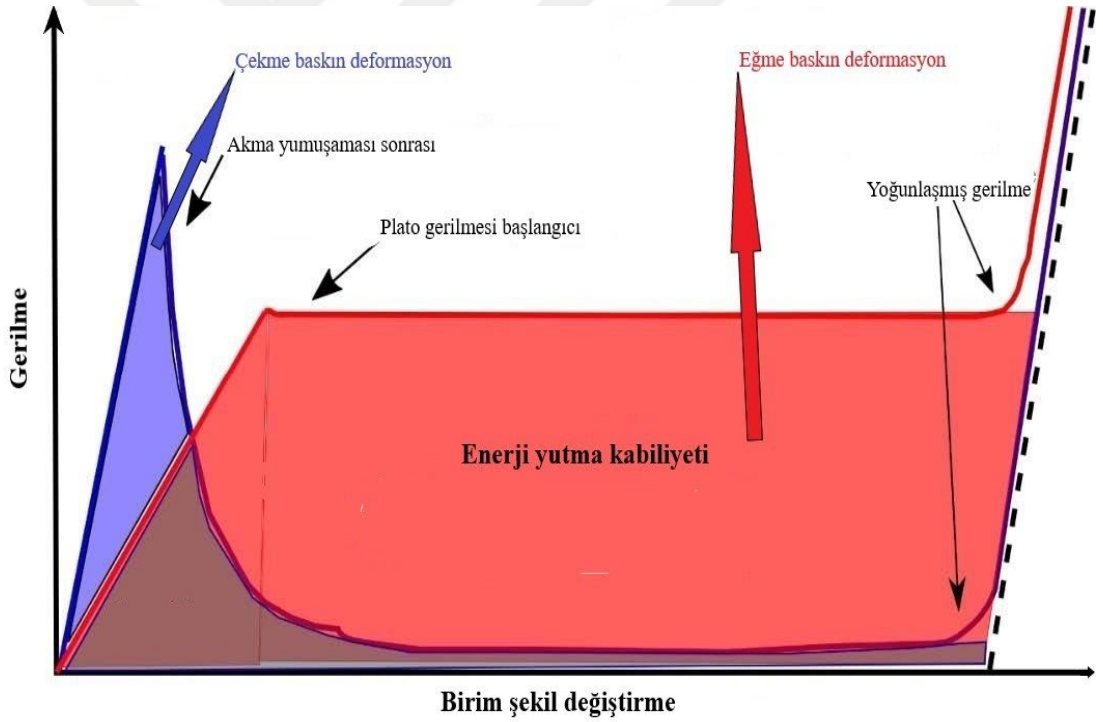
Şekil 2.7 : Birim hücrelerin, çekme (solda) ve eğilme (sağda) baskın davranışlarının şematik gösterimi [37]

Eğilme baskın davranış gösteren yapıda ise uygulanan yükten dolayı hücre duvarlarında eğme momentleri meydana gelir. Uygulanan basma yükünden dolayı meydana gelen eğme momentleri, hücre duvarlarında özellikle eğme gerilmelerine ve ihmal edilebilir bir aksenal gerilmeye neden olur. Bu eğme gerilmelerine maruz kalan birim hücreye ait deformasyon, Şekil 2.8(a)'da gösterildiği gibidir. Hücresel yapının yıkımı aşamalı olarak plastikliğin diğer hücrelere yayılması ile olur, ardından kırılma meydana gelerek hücresel yapı çöker [37].

Şekil 2.9'da, eğilme ve çekme baskın davranış için gerilme-şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir. Daha önce açıklandığı üzere, eğilme baskın davranışa sahip hücresel yapılar, çekme baskın davranışa sahip hücresel yapılara göre daha elastik bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı eğme baskın davranış gösteren hücresel yapıların enerji yutma kabiliyetlerinin çekme baskın davranış gösteren hücresel yapılara göre daha büyük olması beklenmektedir. Şekil 2.9'da verilen egride kırmızı alan eğilme baskın davranışı, mavi alan ise çekme baskın davranışı göstermektedir.



Şekil 2.8 : Basma yükü sonrası, eğilme (a) ve çekme (b) baskın davranış için şekil değişimlerinin gösterilmesi [38]



Şekil 2.9 : Eğilme ve çekme baskın davranış için gerilme şekil değiştirme eğrisi [37]

Şekil 2.9’da, eğilme baskın davranışın üç farklı bölgede gerçekleştiği görülmektedir. İlk bölge lineer elastik şekil değişimini göstermektedir. Bu bölgede gerçekleşen şekil değişimi hücrelerin eğilmesi ile ilgilidir ve elastisite modülü sabit bir değer almaktadır. İkinci bölge plato gerilmesi bölgesidir ve bu bölgede hücresel yapı sabit bir gerilmeye karşılık, artan bir şekil değişimi göstermektedir. Plato gerilmesinden sonra, gerilme keskin bir şekilde artmakta ve hücreler birbirleriyle iç içe geçmektedir. Bu bölge ise

yoğunlaşmış gerilme bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda verilen gerilme şekil değiştirme eğrisinde asıl vurgulanması gereken bölge plato bölgesidir. Çünkü bu gerilme bölgesinde, artan bir şekil değişimine karşılık gerilme neredeyse sabit kalmaktadır. Plato bölgesinde kafes yapıları uygulanan enerjiyi yutmak için eğilmekte ve çökmektedir. Gerilme şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan yutulan enerjiyi temsil etmektedir [34]. Eğme ve çekme baskın yapılara bakıldığında, eğme baskın yapının altında kalan alan, çekme baskın yapının altında kalan alandan bariz bir şekilde daha büyüktür. Dolayısıyla eğme baskın yapının enerji yutum kapasitesi çekme baskın yapıya kıyasla daha fazladır. Ayrıca eğme baskın yapının darbe direnci de daha fazla enerji yuttukları için daha iyidir. Bundan dolayı darbeli yükler altında çalışacak uygulamalar için eğilme baskın davranışa sahip hücreli yapıların tercih edilmesi önerilir. Çekme baskın davranışa sahip hücreli yapılar ise sahip oldukları yüksek akma dayanımı ve rijitliklerinden ya da elastisite modüllerinden dolayı yük taşıyan uygulamalarda tercih edilmektedirler.

2.1.5 İzafi Yoğunluk Kavramı

Hücreli malzemelerin tercih edilmelerinin temel nedeni, düşük ağırlıkta gelişmiş mekanik özelliklere sahip yapıların oluşturulmasına imkân sağlamalarıdır. Hücreli malzemenin ağırlıklarını belirtmek için genellikle gözeneklilik oranı veya izafi yoğunluk kavramları kullanılmaktadır. Bu iki terim birbirini tamamlar niteliktedir. Gözeneklilik oranı ne kadar büyükse, izafi yoğunluk o derece küçük olur. Başka bir ifade ile izafi yoğunluk ile gözeneklilik oranının toplamı bire eşittir. Hücreli yapının izafi yoğunluğu (ρ^*/ρ_s); hücreli malzemenin içi boş haldeki yoğunluğunun (ρ^*), hücreli malzemenin tamamen dolu olması durumundaki yoğunluğuna (ρ_s) oranıdır.

$$\text{İzafi yoğunluk} = \rho^*/\rho_s \quad (2.1)$$

$$\text{Gözeneklilik oranı} = (1 - \rho^*)/\rho_s \quad (2.2)$$

$$\text{İzafi yoğunluk} + \text{Gözeneklilik oranı} = 1 \quad (2.3)$$

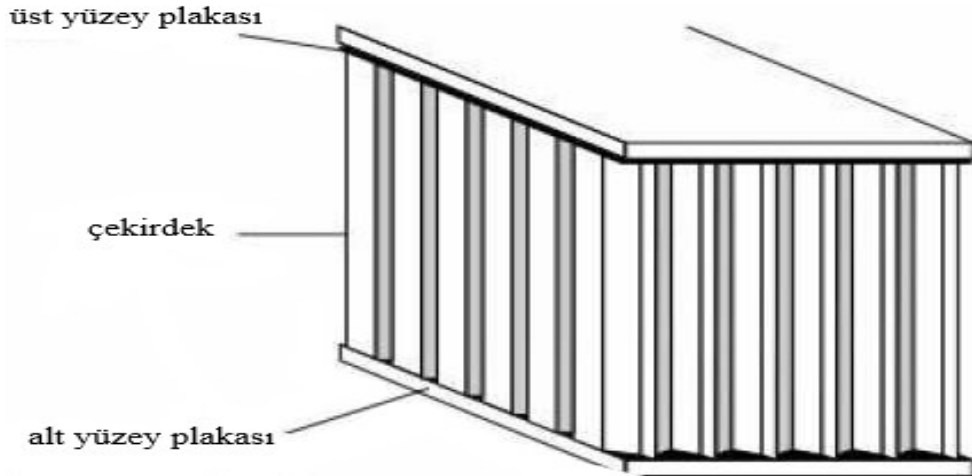
Özel ultra düşük yoğunluklu köpükler, polimerik köpükler, mantar, ahşap ve gözenekli katılar gibi bazı hücreli malzemelerin izafi yoğunluk değerleri, Çizelge 2.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Bazı hücreli malzemelerin izafi yoğunluk değerleri [40].

Malzeme	İzafi Yoğunluk
Özel ultra düşük yoğunluklu köpükler	0,001
Polimerik köpükler	0,05-0,2
Mantar	0,14
Ahşap	0,15-0,40
Gözenekli katılar	> 0,2

2.2 Sandviç Yapılar

Modern yapı teknolojileri, toplam ağırlığı azaltmak ve aynı zamanda yeterli dayanıma sahip yapılar üretebilmek için kompozit malzemelerin kullanımına önem vermektedir. Kullanılan bu kompozit malzemelerden biri de sandviç yapılardır. Düşük ağırlıklarından dolayı tercih edilen sandviç yapılar, yüksek eğilme dayanımı, akustik yalıtım özellikleri, titreşim sönümleme, enerji emilimi ve ısı yalıtımı gibi birçok farklı özelliklerinden dolayı, havacılık ve uzay, otomotiv, savunma sanayi gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sandviç yapılar üç kısımdan meydana gelmektedir. Bu kısımlar, alt yüzey plakası, üst yüzey plakası ve çekirdektir. Şekil 2.10'da sandviç yapının bölümleri basitçe gösterilmektedir.

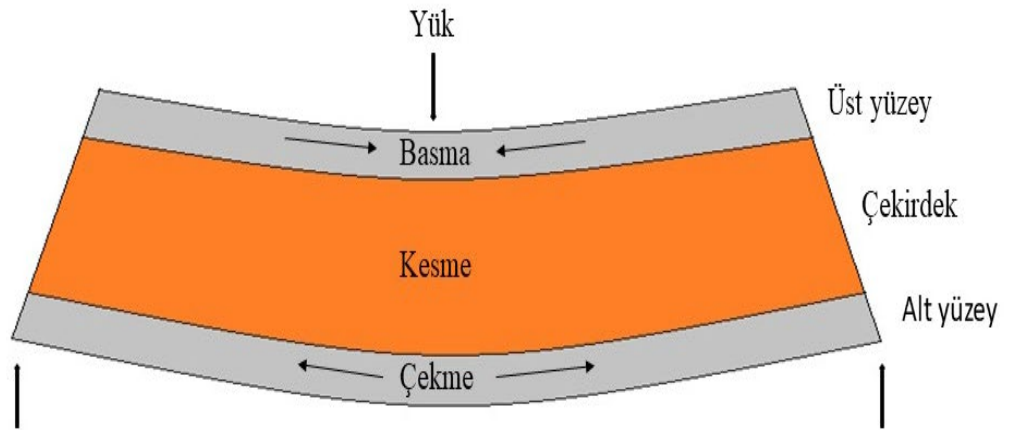


Şekil 2.10 : Sandviç yapının bölümleri [42]

Sandviç yapılarda, yüzeyler ve çekirdek genellikle farklı malzemelerden ya da aynı malzemenin farklı mekanik özellikler sergileyebilen kombinasyonlarından meydana gelmektedir. Bu iki farklı malzemenin katmanlar halinde uygun geometrik ölçütlerde

birleşmesiyle yapı istenilen fonksiyonel işlevi yerine getirmiş olur. Yüzeyde kullanılan malzemeler, sandviç yapının atalet momentini artırmak için birbirlerine belirli bir uzaklıkta yerleştirilirler ve bunun neticesinde eğilme rijitliği artırılmış olur. Sandviç bir panel normal katı bir panel ile kıyaslandığında, aynı ağırlık ve genişlikteki katı panele nispeten daha yüksek bir kalınlığa sahiptir. Sandviç panelin sahip olduğu bu kalınlıktan dolayı, sandviç panellerde daha yüksek bir atalet momenti oluşur ve artan atalet momenti nedeniyle de sandviç panel daha yüksek bir eğilme rijitliğe sahip olmuş olur.

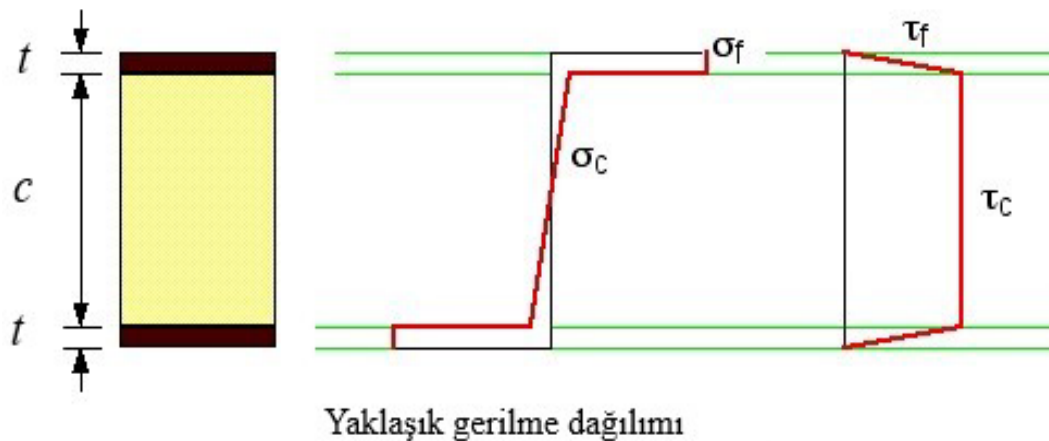
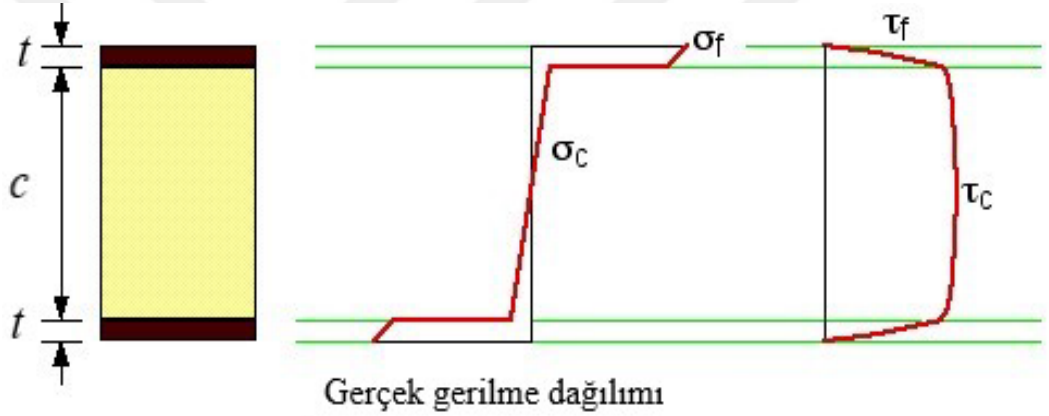
Sandviç yapılarda yüzey plakaları genellikle eğme yüklerini taşıırken, çekirdek bölümü ise enine kesme yüklerini iletir [43]. Sandviç yapıda eğme meydana gelmesi durumunda, yüzey plakaları normal gerilmeler olan çekme ve basma gerilmelerini taşıırken çekirdek ise kayma gerilmelerini taşıyarak yapının eğilme rijitliğini artırır. Şekil 2.11’de, sandviç yapının eğilme durumunda taşıdığı yükler gösterilmektedir. Sandviç yapıda çekirdek, kesme dayanımını arttırmanın yanı sıra yapının bükülme ve burkulma direncini de arttırarak yüzeydeki plakalarla küçük bir ağırlık artışı ile tutunmayı sağlar. Sandviç panellerde kullanılan çekirdek yapısı farklı malzemelerden oluşabilir. Sandviç panellerde çekirdek bölümünde ilk kullanılan malzemeler köpükler olarak bilinmektedir [44]. Çekirdek bölümünde kullanılan diğer malzemelere ise balsa odunu, alüminyum köpükler, bal peteği gibi hücreli malzemeler örnek verilebilir.



Şekil 2.11 : Sandviç yapı elemanlarının eğilme durumunda taşıdığı yükler

Sandviç kompozitlerde meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri, Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Sandviç yapılarda eğme yüklemesi durumunda en büyük normal gerilmeler yüzeyde meydana geldiği için yüzey plakaları eğme durumunda oluşan gerilmelerini taşıyabilecek ölçüde mukavemetli ve ayrıca yapının ağırlığını çok fazla

arttırmayacak kadar da ince olmalıdır. Bu yüzden yüzey plakalarında genellikle karbon fiber, cam fiber, kevlar gibi yüksek dayanıma sahip malzemeler tercih edilmektedir. Çekirdek ise yapının eğilme rijitliğini artırma görevini üstlenmektedir ve düşük yoğunlukla beraber atalet momentini arttıracak biçimde kalın olmalıdır [44]. Çekirdekte kullanılan malzemenin asıl görevlerinden biri eğme yüklemesi durumunda oluşan maksimum kayma gerilmesini taşımaktır. Bu sebepten ötürü, çekirdekte kullanılan malzemenin kayma dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Kayma dayanımının yüksek olması ile kompozit yapının ağırlığını arttırmayacak şekilde yoğunluğunun da küçük olması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı, kompozit sandviç yapıların çekirdek bölümünde köpükler, hem yüksek kayma dayanımına sahip olmalarından dolayı hem de düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 2.12 : Sandviç kompozitlerde meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri [45]

Sandviç yapının mekanik özellikleri, çekirdek ve yüzey plakası malzemelerinin yanı sıra çekirdek ve yüzey plakalarının kalınlığına da bağlıdır. Çoğu durumda sandviç panellerin maksimum rijitlik/ağırlık değerine sahip olması beklenmektedir. Bu yüzden

tasarım işlemleri temel olarak rijitlik/ağırlık veya dayanım/ağırlık gibi bir özelliği en iyi duruma getirecek bir optimizasyon gerektirir.

Sandviç yapılar sahip oldukları, düşük ağırlık, yüksek eğilme dayanımı, akustik yalıtım özellikleri, titreşim sönümlenme, enerji emilimi ve ısı yalıtımı gibi birçok farklı özelliklerinden dolayı, havacılık ve uzay, otomotiv, savunma sanayi gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte sandviç yapılar bünyelerinde bazı dezavantajları da barındırmaktadır. Çizelge 2.2, sandviç yapıların sahip oldukları avantaj ve dezavantajları göstermektedir.

Çizelge 2.2: Sandviç yapıların avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.

Avantajlar	Dezavantajlar
Gereksinime göre özelliklerin fonksiyonel bir şekilde ayarlanabilmesi.	Çekirdekten dolayı nispeten daha kalındırlar.
Yüzey ve çekirdek malzemesi için bol miktarda seçenek bulunması.	Sandviç kompozit malzemeler, konvansiyonel malzemelere göre daha pahalıdırlar.
Düşük yoğunluğa sahiptirler, ağırlığı önemli ölçüde azaltırlar.	Sandviç kompozitlerin işleme maliyetleri daha yüksektir.
Yüksek özgül mukavemet değerlerine sahiptirler.	Plakalar ile çekirdeği birleştirme işlemi zordur.
İyi titreşim ve darbe sönümlenme özelliğine sahiptirler.	Hasar görmeleri halinde tamirleri zordur.
Eğme dayanımları yüksektir.	Basma dayanımları yüksek değildir.

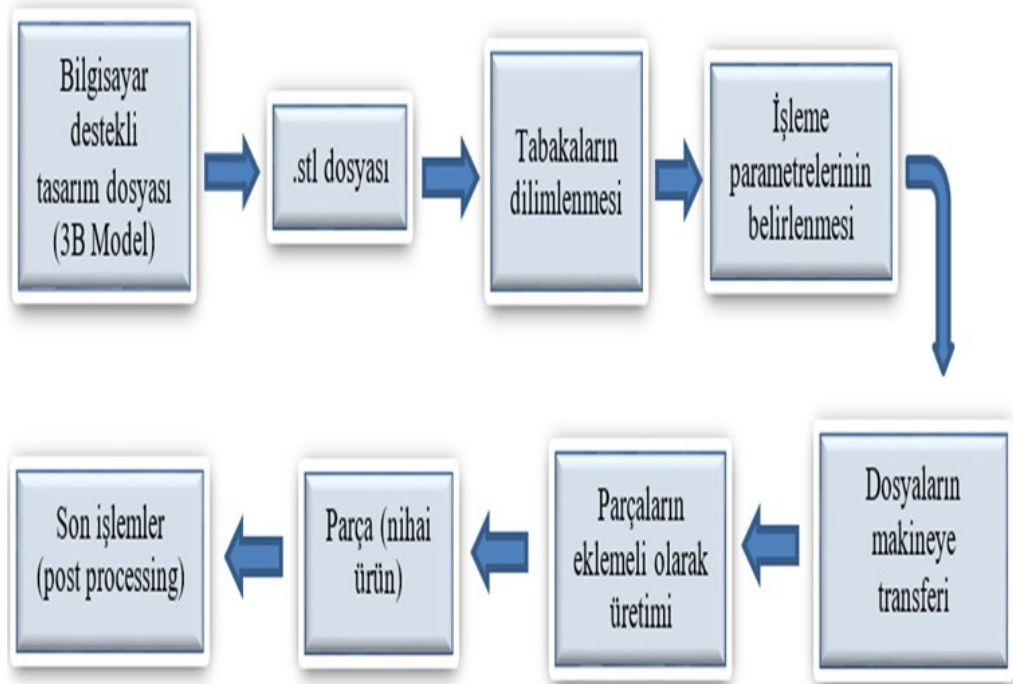
2.3 Eklemeli Üretim

Eklemeli üretim, üç boyutlu model verileri kullanarak, malzemelerin katmanlar halinde üst üste birikmesiyle nesnelere oluşturulduğu üretim yöntemidir [37]. Eklemeli üretim ile baştan sona yeni bir parça üretmek, geleneksel üretim yöntemleriyle kıyaslandığında daha hızlı olduğundan dolayı, eklemeli üretim hızlı

prototipleme olarak da adlandırılmaktadır. Geleneksel tekniklerle prototip oluşturmak için genellikle birkaç farklı üretim tekniğine ve farklı becerilere sahip kişilere ihtiyaç varken, eklemeli üretim ile doğrudan CAD dosyası üzerinden prototip üretimi mümkün hale gelmektedir. Eklemeli üretim ilk olarak 1980'li yıllarda, ultraviyole ışığa duyarlı sıvı polimerin bir lazer kullanılarak ince tabakalar halinde katılması esasına dayanan stereolitografi yöntemi ile ortaya çıkmıştır [46]. Eklemeli üretim, sürecin başlarında sınırlı sayıda malzemenin kullanılabilmesi, üretilen numunelerde oluşan iç boşluklar, basım hataları, moleküllerin yönelim kaybı, yüzey kalitesinin düşüklüğü gibi sebeplerden dolayı çok fazla tercih edilmemiştir [47,48]. Ancak ilerleyen zamanlarda, artan malzeme çeşitliliği, iç boşlukların giderilmesi, basım hatalarının düzeltilmesi ve daha kaliteli yüzeylerin elde edilebilmesi gibi gelişmeler neticesinde eklemeli üretim temel bir üretim yöntemi haline gelmiştir ve daha fazla uygulama alanı bulmuştur [49]. Geleneksel üretim teknikleriyle karşılaştırıldığında eklemeli üretim bazı avantajları ile cazip hale gelmektedir. Bu avantajlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Talaş kaldırma esasına dayanan eksiltmeli üretim yöntemleriyle kıyaslandığında, eklemeli üretim atık malzeme miktarını minimum seviyeye indirerek malzeme verimliliği arttırmaktadır [50]
- Eklemeli üretim, geleneksel üretim tekniklerinde kullanılan aparat, kesici takım, kalıp gibi ilave yardımcı aletlere gereksinim duymamasından dolayı maliyeti önemli ölçüde azaltmaktadır [51].
- Eklemeli üretim, ilave üretim süreçlerine gerek kalmadan parçaların doğrudan tek seferde üretebildiği bir yöntemdir. 3 boyutlu yazıcılar ile tasarım ve üretim arasındaki kademeler atlanarak, tasarımdan doğrudan imalat yapılır. Bu özelliğinden dolayı iş gücünü ve zamanı azaltarak verimliliği artırır [52].
- Geometrik kısıtlamaları ortadan kaldırır ve tasarım özgürlüğünü sağlar, geleneksel tekniklerle üretilmesi çok zor veya imkânsız olan periyodik hücreli yapılar eklemeli üretim ile kolayca üretilebilir [16].
- Prototip üretiminde maliyeti önemli ölçüde azaltır [52].
- İki veya daha fazla parçadan oluşan parçalar doğrudan tek bir seferde basılabildiğinden montaja gerek yoktur.

Eklemeli üretimin aşamalarını temel olarak özetlemek gerekirse tüm yöntemler için işleyiş, Şekil 2.13’de gösterildiği gibidir. İlk olarak üretilecek olan parça Solidworks, Catia vb. bir bilgisayar destekli tasarım programıyla tasarlanır. Daha sonra tasarlanan üç boyutlu model dosyası, üç boyutlu verilerin düzenini açıklayan ve katı modelin yüzey geometrisini çok küçük üçgenlere parçalayarak yeniden oluşturan STL (STereoLithography) dosya formatına dönüştürülür. STL dosya formatı, üç boyutlu parçaların eklemeli üretimi için 3 boyutlu model verisini standart bir veri biçimi olarak saklayabilen ve üç boyutlu yazdırma işlemi için en iyi iş akışını sağlayan yaklaşık 30 yıllık geçmişe sahip bir formattır. STL dosya formatına dönüştürülen 3 boyutlu modelden üretim yapılabilmesi için “Slicer” ya da dilimleyici diye adlandırılan 3 boyutlu yazıcı ara yüz programına ihtiyaç vardır. Bu dilimleyici programa örnek olarak, Cura programı verilebilir. Bu program 3 boyutlu modelinizi girmiş olduğunuz parametrelere göre dilimlere ayırır. Böylece 3 boyutlu yazıcı modeli katmanlar halinde oluşturarak katı model haline getirir. Bu katmanlar, Gcode formatındadır. Gcode formatı 3 boyutlu yazıcının katı modelleri oluşturmak için kullandığı dildir. Daha sonra işleme sıcaklığı, katman kalınlığı, işleme hızı, tabla sıcaklığı vb. gibi işleme parametreleri belirlenerek Gcode formatındaki katı model 3B eklemeli üretim cihazına transfer edilerek nihai ürün oluşturulur. Tercihen, son işlem olarak yüzey kalitesini arttırmak ya da parçayı renklendirmek için üretim sonrası işlemler uygulanabilir.



Şekil 2.13 : Eklemeli üretim yönteminin temel aşamaları

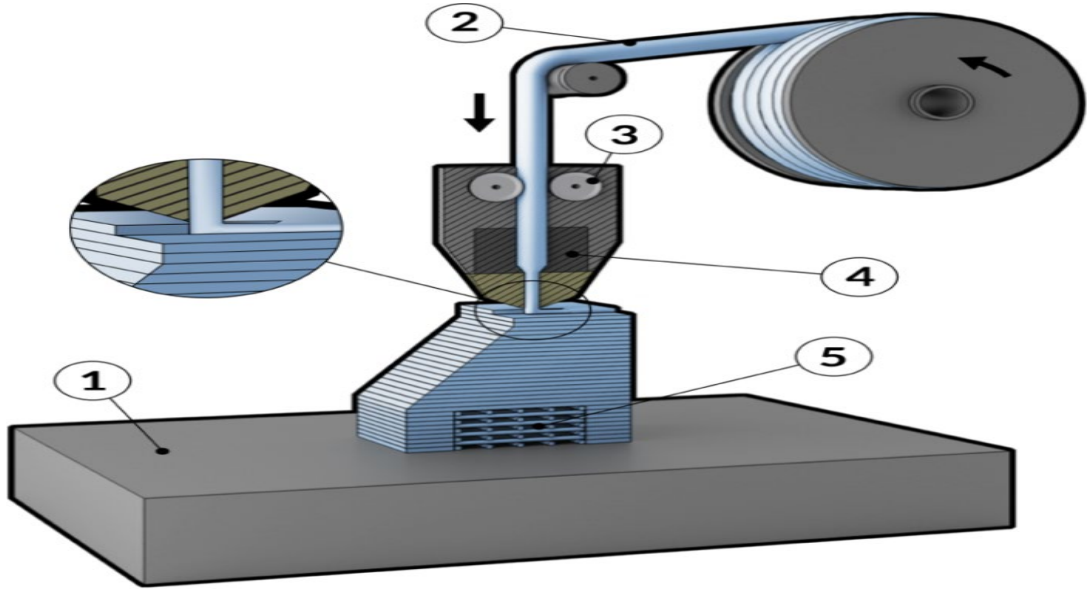
1990'lı yılların başlarında Kurth, eklemeli üretim yöntemlerini kullanılan malzemeye göre; sıvı, toz ve katı temelli olmak üzere üç farklı kategoriye ayırmıştır [53]. Eklemeli üretim yöntemlerinin bir başka sınıflandırması ise Williams ve arkadaşları tarafından oluşturulmuştur [54]. Ancak en geniş sınıflandırma ASTM F2792 standardında yer almaktadır [55]. ASTM F2792 standardına göre eklemeli üretim teknolojileri temel olarak yedi farklı kategoride incelenmiştir. Bu kategoriler; malzeme ekstrüzyon, toz yatağı birleştirme, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, saç/plaka tabakalama ve doğrudan enerji depolamadır. Çizelge 2.3, yedi farklı kategoriye ayrılmış eklemeli üretim teknolojileri için, kullanılan malzeme, güç kaynağı, avantaj ve dezavantajları belirtmektedir. Belirtilen tüm bu yöntemlerde elyaf, kum, sıva, cam, odun filamentleri ve diğer biyo-materyaller gibi çok çeşitli malzeme kullanılmasına rağmen en yaygın kullanıma sahip malzemeler; plastik polimerler, metaller ve seramikler olarak bilinmektedir [56].

Eriyik yağma modelleme (EYM) yöntemi, 1989 yılında Stratasys şirketinin kurucu ortağı Steven Scott Crump tarafından keşfedilmiştir [57]. Bu yöntemin patenti A.B.D. patent enstitüsü tarafından 9 Haziran 1992 tarihinde verilmiştir. 2007 yılında patent süresinin dolması ile beraber EYM yönteminin yazılımı açık kaynak haline gelmiş ve bu yöntemin kullanımı hızla artarak şuanda en yaygın kullanıma sahip yöntem olmuştur [58].

EYM oldukça basit bir işleyişe sahip eklemeli üretim yöntemidir. Bu yöntemde filament diye adlandırılan termoplastik polimer, zıt doğrultularda dönen iki merdanelen geçerek bir ısıtıcıya hareket ettirilir. Eriyen polimer itme kuvvetinin etkisi ile nozzle denilen parçadan çapı küçültülerek işleme tablasına akıtılır. Kullanılan filamentlerin çapları genellikle 1,85 mm ya da 2,85 mm iken en sık kullanılan nozzle çapları 0,2mm ve 0,4mm olarak bilinir. Eriyerek dışarı akan polimer x-y ekseninde istenilen doğrultuda hareket ettirilerek, bir katman oluşturulmuş olur. Burada katman kalınlığı, x ve y eksenlerindeki işleme hızı ve itme kuvvetinin etkisiyle meydana gelen akış hızının bileşkesi olarak ortaya çıkar. Bu şekilde oluşturulan katmanların z eksenini boyunca, üst üste birikmesi ile istenilen nihai ürün 3 boyutlu olarak üretilir [59]. Şekil 2.14'de EYM yönteminin sistem şematığı gösterilmektedir. Burada 1 numara, inşa platformunu (işleme tablası), 2 numara termoplastik filamentini, 3 numara birbirine ters yönde dönen merdaneleri, 4 numara nozzle ve ısıtıcının bulunduğu ekstrüzyon kafasını ve 5 numara ise üretilen parçayı göstermektedir.

Çizelge 2.3: Eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [55].

Kategori	Teknoloji	Kullanılan Malzeme	Güç Kaynağı	Avantaj ve Dezavantajları
Malzeme Ekstrüzyon	Eriyik Yığıma Modelleme(EYM)	Termoplastikler Metal Macunu Seramik Macunu	Isıl Enerji	<ul style="list-style-type: none">• Ucuz makine fiyatları• Malzeme çeşitliliği fazladır• Kötu yüzey kalitesi
Toz Yatağı Birleştirme	Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamid/Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek doğruluk ve detay• Yüksek özgül dayanım ve rijitlik• Destek malzemesi gerekli değil
	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	Atomize metal tozları (Paslanmaz çelik, Kobalt kromu, Titanyum Ti6Al-4V), Seramik tozları		<ul style="list-style-type: none">• Kötu yüzey kalitesi• Zaman alıcı
	Seçmeli Lazer Ergitme (SLE)			
	Elektron Demeti Ergitme (EBM)			
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer, Seramikler (alüminyum oksit, Zirkon, PZT)	Foton Enerjisi	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek işleme hızı• Yüksek yüzey kalitesi• Yüksek ekipman ve hammadde maliyeti
Malzeme Püskürtme	Polijet (PJ)/ Mürekkep Püskürtmeli Yazdırma	Fotopolimer, Vax (balmumu)	Elektrik Enerjisi	<ul style="list-style-type: none">• Çoklu malzeme üretebilme• Yüksek yüzey kalitesi• Düşük dayanımlı malzemeler
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtmeli Yazdırma	Polimer tozu (alçı tozu, reçine), Seramik tozu, Metal tozu	Elektrik Enerjisi	<ul style="list-style-type: none">• Renkli baskı yapabilme imkânı• Malzeme çeşitliliği fazladır• Üretilen parçalarda yüksek gözeneklilik miktarı
Saç/Plaka tabakalama	Katmanlı Nesne Üretimi (LOM)	Plastik film, Metal plaka, Seramik şerit	Lazer Işını	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek yüzey kalitesi• Düşük malzeme, ekipman ve işleme maliyeti
Doğrudan Enerji Depolama	Elektron Işın Kaynaklama (EBW)	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	<ul style="list-style-type: none">• Hasara uğramış parçaların tamirini mümkün kılar• Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş parçaların üretimi mümkündür.
	Lazerle İşlenmiş Net Şekillendirme (LENS)			<ul style="list-style-type: none">• Üretim sonrası işlemler gereklidir.



Şekil 2.14 : Eriyik yığıma modelleme yönteminin sistem şematığı [60]

EYM eklemeli üretim yönteminde bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyaları stl (Stereolitografi) formatına dönüştürülerek, eklemeli üretim cihazının tanıyabileceği bir hal alır. Daha sonra tabakalara ayırma işlemi Cura veya benzeri bir programla yapılır. Bu esnada EYM yönteminin işleme parametrelerinden olan; tabaka kalınlığı, doluluk oranı, işleme sıcaklığı, tabla sıcaklığı, akış oranı, işleme hızı vb. gibi parametreler belirlenerek üç boyutlu yazıcıya aktarılır. EYM yönteminde, gerekli durumlarda suda çözünebilen veya elle kolayca sökülebilen destek malzemesi kullanımı gerekli olabilir. Destek malzemesi kullanımı, çift nozzle'a sahip yazıcılarda mümkündür.

EYM' de en çok kullanılan termoplastik polimerlerden bazıları, polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), Polieter Eter Keton (PEEK) olarak bilinmektedir [61]. Bu termoplastik malzemelerden PLA, iki fazlı bir bozunmaya sahiptir ve mısır veya şeker pancarından üretilebildiği için tamamen geri ayrışabilen bir malzemedir [62]. PLA'nın tamamen doğal malzemelerden üretilebilmesinden ve kolayca bozunabilmesinden dolayı, çevreye herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır. EYM'de kullanılan termoplastik malzemeler, yoğunluk, elastisite modülü, kopma uzaması, eğme modülü, eğme dayanımı, kayma dayanımı, kopma dayanımı, darbe özellikleri, sertlik, işleme sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı gibi karakteristik malzeme özellikleri göz önüne alınarak, üretilecek parçalarda uygun bir şekilde kullanılabilir.

EYM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri, ekstrüzyona tabi tutulan parçaların mekanik özelliklerine kıyasla önemli ölçüde daha zayıftır [63]. Bunun temel sebebi, içyapıda oluşan boşluklardan ya da moleküllerin yönelim kaybından kaynaklanmaktadır [64]. EYM yöntemi ile üretilen parçalar, tarama deseni, tarama yönü ya da inşa yönüne bağlı olarak anizotropik özellikler göstermektedirler. Anizotropik malzemeler için fiziksel özellikler farklı yönlerde ve doğrultularda değişiklik gösterirken, izotropik malzemeler yönden bağımsız olarak her doğrultu ve yönde aynı fiziksel özellikleri gösterebilen malzemelerdir.

EYM yönteminde üretilen parçaların mekanik özellikleri işleme parametreleriyle doğrudan ilişkilidir. EYM ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için işleme parametrelerinin optimize edilmesine dair birçok çalışma literatürde yer almaktadır [65]. Çizelge 2.4' de, EYM yöntemi için farklı işleme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisiyle ilgili daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. EYM yönteminde kullanılan işleme parametreleri; dilimleme parametreleri, inşa yönü ve sıcaklık koşulları olarak üç temel gruba ayrılabilir [66].

- Dilimleme parametreleri: Katman (tabaka) kalınlığı, nozzle çapı, akış hızı, işleme hızı, doluluk oranı, tarama yönü, tarama açısı, tarama genişliği, tarama deseni, kontur genişliği, üst kalınlık, alt kalınlık gibi parametrelerdir ve üretilecek parçanın mekanik davranışına etki etmektedir.
- İnşa yönü: EYM yöntemi ile üretilen parçalar, tarama deseni, tarama yönü ya da inşa yönüne bağlı olarak anizotropik özellikler göstermektedirler. Üretilecek parçaların dikey, yatay ya da yanal inşa yönünde üretilmesi, yapının farklı mekanik özellikler göstermesine neden olur.
- Sıcaklık koşulları: EYM yönteminde kullanılan termoplastik malzemeler, çevre sıcaklığı, işleme sıcaklığı (ekstrüzyon sıcaklığı) ve tabla sıcaklığının değişimine bağlı olarak farklı mekanik özellikler gösterirler.

Çizelge 2.4: EYM yönteminde farklı işleme parametrelerinin mekanik özelliklere etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar [66]

Çalışma	Araştırma amacı/ konusu	Kullanılan malzemeler, makineler ve standartlar	Değiştirilen parametreler	Mekanik özellikler
Tymark, 2014 [67]	Farklı a çık kaynaklı 3B yazıcılar için geçkeçi koşullarda mekanik özelliklerin karşılaştırılması	ABS, PLA, Açık kaynaklı yazıcılar (Lulzbot Prusa, Prusa Mendel, Custom Most RepRap, Mendel RepRap), ASTM D638, Slic3r®, Cura®, Skeinforge®	Çeşitli katman kalınlıkları ve tarama yönleri	Çekme dayanımı, elastisite modülü
Lanzotti, 2015 [68]	Makerbot 3B yazıcı ile üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi	PLA, Rep Rap Prusa i, ASTM D638	2 farklı katman kalınlığı, 2 farklı inşa yönü, 3 farklı doluluk oranı	Çekme dayanımı, elastisite modülü
Onwubolu, 2016 [69]	Mekanik özelliklerin karakterizasyonu ve optimizasyonu	ABS, FDM Fortus 400mc, ISO R527:1966, ISO R178:1975	2 farklı katman kalınlığı, 2 farklı inşa yönü, 2 farklı tarama açısı, 4 farklı tarama genişliği	Çekme dayanımı
Alvarez, 2016 [70]	Doluluk oranının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi	ABS, Replicator 2x, ASTM D638, ASTM D6110	Doluluk oranı (%0-100, %5 artış)	Çekme dayanımı, darbe dayanımı
Hernandez, 2016 [71]	Mekanik özelliklere inşa yönünün etkisi	ABS P430, uPrint SE Plus, ASTM D695, ASTM D790, ASTM D 638	5 farklı inşa yönü	Çekme dayanımı, basma dayanımı, eğme dayanımı
Torres, 2016 [72]	Mekanik özelliklerin optimizasyonu	PLA, Replicator 2, ASTM D638, ASTM E143, ASTM D648	Farklı işleme ve tabla sıcaklıkları, doluluk oranı, katman kalınlığı	Çekme dayanımı
Mahmood, 2017 [73]	Kısmen doldurulmuş parçaların çekme dayanımlarının incelenmesi	ABS, Makerbot Replicator 2x, ISO 527:2012, Tip 1B numune	Tabaka kalınlığı, doluluk oranı, tarama genişliği (her birinden 3 adet)	Çekme dayanımı
Raney, 2017 [74]	ABS parçaların çekme dayanımının deneysel karakterizasyonu	ABS, Uprint SE Plus, ASTM D638-02a standardı tip IV numune	İnşa yönü, doluluk oranı (her birinden 3 adet)	Çekme dayanımı
Cantrell, 2017 [75]	ABS malzemesinden üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinin karakterizasyonu	ABS, Ultimaker PC, ASTM D-638, ASTM D-5379	Tarama açısı (45/-45; 30/-60; 15/-75; 0/90), inşa yönü (3 adet)	Çekme dayanımı, poisson oranı, Young modülü
Chacon, 2017 [76]	PLA parçaların mekanik özellikleri ve optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi	PLA, WitBox desktop 3B yazıcı, Cura®, ASTM D638, ASTM D790	3 farklı işleme yönü, 4 farklı katman kalınlığı, 3 farklı işleme hızı	Çekme dayanımı, eğme dayanımı

2.4 Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların İncelenmesi

Yazdani Sarvestani vd. [77] gerçekleştirdikleri çalışmada, yaygın olarak kullanılan kübik, octet ve auxetic birim hücrelerinin yanı sıra, kübik ve octet birim hücrelerinin birleşmesinden meydana gelen isomax olarak adlandırdıkları birim hücreyi de sandviç yapının çekirdek bölümünde kullanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan periyodik hücresel çekirdeğe sahip eğme ve darbe numuneleri, EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiştir. %30 ve %50 izafi yoğunluğa sahip, farklı birim hücrelerden oluşan meta-sandviç yapıların yarı-statik (quasi-statik) eğme ve düşük hızlı darbe davranışları deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda isomax birim hücrelerine sahip yapının diğer yapılarla kıyaslandığında, üç nokta eğme testi sırasında daha yüksek bir rijitliğe ve dayanıma sahip olduğu, ancak emdiği enerjinin çok fazla değişiklik göstermediği görülmektedir. Yapılara düşük hızlı darbe uygulanması durumunda ise, kübik, octet ve isomax birim hücrelerinden oluşan meta-sandviç yapılar, yaklaşık olarak aynı miktarda enerji yutma potansiyeline sahipken, auxetic birim hücrelerinden oluşan yapı daha düşük miktarda enerji yutmaktadır. Bu çalışmada, kübik ve octet birim hücrenin birleşmesinden meydana gelen isomax birim hücrelerinin gelişmiş mekanik özellikler göstermiştir. Yine bu çalışma ile mekanik özelliklerin birim hücre geometrisine ve izafi yoğunluğa bağlılığı açıkça ortaya konmuştur. Ayrıca sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla yaklaşık olarak aynı değerleri vermesi ile daha sonra yapılacak optimizasyon çalışmaları için iyi bir model oluşturulmuştur.

Ingrole vd. [78] yapmış oldukları çalışmada, bal peteği ve re-entrant auxetic birim hücrelerini temel alarak, modifiye edilmiş auxetic, auxetic-bal peteği 1(AH-V1) ve auxetic-bal peteği 2(AH-V2) birim hücreleri tasarlamışlardır. Tasarladıkları birim hücreleri kullanarak, EYM eklemeli üretim yöntemi ile ABS malzemesinden basma testi için numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri numunelere yapmış oldukları basma yüklemesi neticesinde, beş farklı yapının şekil değişimlerini, hata mekanizmalarını ve mekanik performanslarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre; modifiye edilmiş auxetic birim hücrelerine sahip yapının basma dayanımı, auxetic birim hücrelerine sahip yapıya kıyasla %65 ve re-entrant auxetic birim hücrelerine sahip yapıya kıyasla ise %300 daha fazladır. Ayrıca modifiye edilmiş auxetic yapı, bal peteği yapısına göre %30 ve re-entrant auxetic yapısına göre ise %70 daha fazla enerji emebilmektedir. En yüksek young modülü ise, bal peteği ve

re-entrant auxetic hücrelerine sahip yapılarda görülmüştür. Bu çalışma, birim hücre şeklini değiştirmenin yapının mekanik davranışını ayarlama en önemli parametrelerden biri olduğunu açıkça belirtmektedir.

Özdemir vd. [79] yapmış oldukları deneysel çalışmada, kübik, elmas ve re-entrant birim hücrelerini kullanarak, 3B eklemeli üretim yöntemlerinden Elektron Demeti Eritme (EBM) yöntemi ile hücresel yapılar üretmişlerdir. Ürettikleri yapılarda, 45-110 µm boyutunda küresel Ti6Al4V metal tozu kullanmışlardır. Ürettikleri bu farklı hücresel yapılara, yarı statik ve dinamik yükleme uygulamaları durumunda, hücre topolojisinin ve birim hücre katman sayısının emilen enerji miktarlarına etkisini incelemişlerdir.

Ullah vd. [80], deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi kullanarak, Ti-6Al-4V malzemesinden, kagome ve atomik truss birim hücre topolojilerine sahip hücresel yapılar üretmişlerdir. Ürettikleri hücresel yapılara uyguladıkları basma testi sonucunda, hücre topolojisinin emilen enerji miktarına etkisini araştırmışlardır. Ayrıca birim hücre şekli için enerji yutma kabiliyetlerini tahmin eden bir tekli hücre yaklaşımı kullanmışlardır.

Mohsenizadeh vd. [81], STL 3B eklemeli üretim yöntemi kullanarak iki farklı polimerden, çeşitli izafi yoğunluklarda hafif polimerik meta-malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri yapılara uyguladıkları basma testi sonucunda, %70 birim uzama değerine kadar yapının kalıcı şekil değiştirmeden tekrar ilk halini kazanabildiğini ve oluşturdukları bu hafif meta-malzemelerin polimerik köpüklere kıyasla daha yüksek miktarda enerji emebildiğini göstermişlerdir.-

Choy vd. [82] yapmış oldukları çalışmada, kübik ve bal peteği birim hücrelerinden oluşan kafes yapıları için hücre duvarı kalınlıklarını fonksiyonel olarak kademeli bir şekilde değiştirerek, yapı içerisinde yukarıdan aşağıya yoğunluğu artan başka bir ifadeyle yoğunluğun yapı boyunca değişken olduğu numuneler üretmişlerdir. Yoğunluktaki bu değişikliğin, basma yüklemesi durumunda deformasyon şekline ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan basma numuneleri, Ti-6Al-4V malzemesinden Seçici Lazer Ergitme(SLM) eklemeli üretim yöntemi ile üretilmiştir. Sabit yoğunluğa sahip numuneler için basma yüklemesi esnasında deformasyon, kayma gerilmesine maruz kalan hücre duvarlarının aniden çapraz bir çatlak ile çökmesiyle meydana gelirken, kademeli olarak yoğunluğu

ayarlanmış hücresel yapılarda deformasyon, yoğunluğun en düşük olduğu tabakadan başlayarak daha yoğun tabakalara doğru devam etmektedir. Ayrıca kademeli olarak aşağıdan yukarıya izafi yoğunluğu azalan numuneler, eşit miktarda malzeme kullanılarak üretilen üniform izafi yoğunluğa sahip numunelere kıyasla %67 ile %72 arasında daha fazla enerji hapsedmiştir. Bu çalışmadan anlaşılacağı üzere hücre yoğunluğunun fonksiyonel olarak değiştirilmesi neticesinde yapının mekanik özelliklerinde kayda değer iyileşmeler meydana gelebilmektedir.

Yazdani Sarvestani vd. [16] yapmış oldukları çalışmada, auxetic, dikdörtgen ve altıgen birim hücrelerini dikey ve yatay şekilde konumlandırarak, birim hücre şeklinin ve doğrultusunun, enerji yutma kabiliyetine ve yapısal özelliklere etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan numuneler, EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiştir. Düşük hızlı darbe testi sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar, yarı analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak doğrulanmıştır.

Al-Ketan vd. [83] yaptıkları çalışmada, destek temelli; kelvin, octet truss, gibson ashby, iskelet temelli; ıwp, elmas, gyroid ve saç temelli; ıwp, elmas, gyroid ve primitive hücre topolojilerini kullanarak, üç farklı sınıflandırmaya ayırdıkları periyodik hücresel yapıların quasi statik basma durumundaki hücre topolojisi - mekanik özellik ilişkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan numuneler, SLS eklemeli üretim yöntemi ile maraging çeliği tozundan üretilmiştir. Üretilen yapıların deformasyon tipleri, gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin yorumlanmasıyla, eğilme ve çekme baskın deformasyon olarak birbirinden ayrılmıştır. Saç temelli hücresel yapıların kullanılan diğer hücresel yapılara kıyasla daha yüksek young modülüne ve maksimum gerilmeye sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca tüm yapılar içerisinde en iyi mekanik özellikleri saç temelli elmas birim hücrelerine sahip yapı göstermiştir.

Habib vd. [84] çalışmalarında, altı farklı hücre topolojisi kullanarak ürettikleri numunelere yapmış oldukları yarı statik basma testi sonucunda, yapıların elastisite modülleri, dayanabilecekleri maksimum dayanımlar ve enerji yutma kabiliyetlerini araştırmışlardır. Bu çalışmada kullanılan numuneler, Multi Jet Fusion (MJF) eklemeli üretim yöntemi ile poliamid 12 (PA12) malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, hücresel kafes yapılarının geometrisini değiştirmenin enerji yutma miktarlarını değiştirilebileceği ve kontrol edilebileceğini göstermektedir. Yine bu çalışma sonucunda, eğme baskın deformasyona sahip hücresel yapıların düşük

rijitlik ve dayanıma sahip olmasına rağmen iyi derecede enerji emebildiği, çekme baskın deformasyon sergileyen hücresel yapıların ise dayanım ve rijitliklerinin yüksek olmasına rağmen daha az miktarda enerji emebildiği sonucuna varılmıştır.

Gümrük [85] tez çalışmasında, SLE eklemeli üretim yöntemi kullanarak 316L paslanmaz çelik malzemesinden ürettiği mikro kafes yapılı malzemelerin mekanik davranışlarını deneysel, sayısal ve teorik olarak incelemiştir. Deneysel olarak gerçekleştirdiği statik ve dinamik test çalışmaları sonucunda, kafes yapılarında statik ve dinamik yükleme durumundaki mekanik özellikleri ve deformasyon davranışlarını etkileyen en önemli parametrelerin, izafi yoğunluk ve hücre topolojisi olduğunu deneysel sonuçlarla ortaya koymuştur. Teorik çalışmasında ise farklı topolojilere sahip kafes yapıları için, klasik mekanik formülasyonlar kullanılarak elastisite modülü ve çökme gerilmesini tahmin eden teorik ifadeler elde etmiştir.

Liao vd. [86] çalışmalarında, poliamid 12 paletlerin ve sürekli karbon fiberlerin bir kap içerisinde önce eritilmesi daha sonra ekstrüzyon işlemine tabi tutulmasıyla, EYM eklemeli üretim yönteminde kullanılmak üzere karbon fiber takviyeli PA12 filamentler üretmişlerdir. Üretilen karbon fiber takviyeli poliamid 12 filamentlerde karbon fiber yoğunluğu, ağırlıkça %2, 4, 6, 8, 10 olacak şekilde ayarlanmıştır. Karbon fiber takviyeli PA12 filamentlerin mekanik performanslarını karakterize etmek için üç nokta eğme testi, çekme testi ve darbe testinde kullanılmak üzere numuneler üretilmiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda, EYM yöntemi ile ağırlıkça %10 oranında üretilen karbon fiber/PA12 kompozit numunesinin genel mekanik performansının en iyi seviyede olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ağırlıkça %10 CF içeren PA12 kompozitlerin çekme dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla, %102,2 ve %251,1 oranında artmıştır. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) tarafından elde edilen görüntüler ile karbon liflerinin, kompozitlerdeki dağılım ve oryantasyonu gözlemlenmiş ve karbon lifleri ile termoplastik matris arasındaki kırılma yüzeyleri açığa çıkarılmıştır.

Ning ve ark. [87] EYM yönteminde kullanılan saf termoplastik malzemelerin sınırlı mekanik özellikler sunmasından dolayı, mevcut filamentlerin daha iyi özellikler göstermesi için geliştirilmesinin kritik bir ihtiyaç olduğunu ortaya atmışlardır. Bu ihtiyaç neticesinde, mevcut termoplastik filamentlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için termoplastik malzemelere takviye malzemeleri (karbon lifleri gibi) ilave etmişleridir. ABS termoplastik malzemesi ile ağırlıkça %3, 5, 7.5, 10, 15

oranında karbon fiber tozlarını karıştırılarak ekstrüzyon işlemi sonucunda karbon fiber takviyeli ABS filamentler üretilmiştir. Karbon fiber takviyeli ABS filamentler kullanılarak EYM ile üretilen numunelerin, çekme özellikleri (çekme dayanımı, young modülü, tokluk değeri, akma dayanımı ve süneklik) ve eğilme özellikleri (eğilme dayanımı, eğilme modülü, eğilme rijitliği ve eğilme akma dayanımı) deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca yapılan çekme ve eğme testleri sonrasında, SEM görüntüleri analiz edilerek kırılma ara yüzleri gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir. Yaklaşık olarak en iyi mekanik özellikler %5 ve %7.5 karbon fiber takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir, karbon fiber oranını daha fazla arttırmak mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur.

Kaur vd. [88] çalışmalarında, çekme baskın deformasyon gösteren octet ve octahedral truss birim hücrelerinden oluşturulmuş yapıların çekme özelliklerini, deneysel ve sonlu elamanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada numuneler, EYM eklemeli üretim yöntemi ile naylon 618, PLA ve karbon fiber takviyeli PLA (CFR-PLA) malzemelerinden üretilmişlerdir. Yapılan basma testleri ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, en yüksek basma dayanımı, elastisite modülü ve enerji yutma kabiliyeti, CFR-PLA malzemesinden üretilmiş octahedral truss birim hücreli yapıda gözlemlenmiştir.

Tian vd. [89] yapmış oldukları çalışmada yenilikçi bir yaklaşım ile EYM eklemeli üretim yöntemini kullanarak, sürekli karbon fiberleri ve PLA malzemesini eş zamanlı olarak besleyebilen bir sistem oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sistem ile kompozit yapı üretmeyi başarmışlardır. Bu çalışmada katman kalınlığı, tarama boşluğu, işleme hızı, fiber miktarı gibi parametrelerin eğilme dayanımı üzerine etkileri incelenmiştir. Değişken karbon fiber miktarlarına sahip numuneler arasından, ağırlıkça %27 karbon fiber içeriğine sahip kompozit yapının eğme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla en yüksek değerler olan, 335 MPa ve 30 GPa olarak bulunmuştur. Ayrıca en uygun, işleme sıcaklığı aralığı 200 °C - 230 °C, katman kalınlığı değeri 0.4mm – 0.6mm, tarama aralığı mesafesi 0.6 mm olarak rapor edilmiştir. Bu çalışma sonucunda üretilen kompozit yapıların, havacılık ve uzay uygulamalarında yüksek dayanım/ağırlığa sahip olmalarından dolayı tercih edilmesi olası görülmektedir.

Tekinalp vd. [90] EYM yönteminde kullanılan mevcut termoplastik filamentlerin yük taşıyan uygulamalarda gerekli mekanik özellikleri karşılayamamasından dolayı, daha iyi mekanik özellikler sergileyebilen malzeme arayışına girmişlerdir. ABS termoplastik

malzemesi ile 3.2 mm uzunluğundaki karbon fiberler 220 °C sıcaklıkta, ağırlıkça %10, 20, 30, 40 oranında karbon fibere sahip olacak şekilde karıştırıldıktan sonra ekstrüzyon işlemine tabi tutularak karbon fiber takviyeli filamentler üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan çekme numuneleri, basma kalıbı ve EYM eklemeli üretimi olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmiştir. Üretilen numunelere yapılan çekme testleri sonucunda karbon fiber oranı %40 olan numunelerde çekme dayanımının ve elastisite modülünün sırasıyla %115 ve %700 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri incelendiğinde EYM ile üretilen numunelerin basma kalıbı ile üretilen numunelere kıyasla daha iyi fiber yönlenmesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Chen vd. [91], bal peteği birim hücre yapısının içerisine üçgen kafes yapıları yerleştirerek oluşturdukları hiyerarşik hücresel yapısının, basma yüklemesi durumundaki mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada numuneler PJ (Polijet) eklemeli üretim yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Eşit izafi yoğunluğa sahip normal bal peteği ve hiyerarşik bal peteği yapılarının basma testleri sonucunda, hiyerarşik bal petekli yapı normal bal petekli yapıya göre 6.6 kat daha fazla rijitlik ve 7.5 kat daha fazla enerji yutma kabiliyetine sahiptir. Ayrıca hiyerarşik yapılarda rijitlik ve akma dayanımı ile izafi yoğunluk arasında neredeyse doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir.

Gautam vd. [92], EYM eklemeli üretim yöntemi ile ABS malzemesinden ürettikleri kagome truss birim hücrelerinin basma performansını incelemiştir. Parça inşa yönü, kagome hücrelerinin radyus değeri ve yüzey pürüzlülüğünün, dayanım ve rijitlik değerlerine etkisi araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü arttırmak için %90 (v/v) aseton kullanılmıştır ve yüzey pürüzlülüğü %90 oranında iyileşme göstermiştir. Parça inşa yönündeki değişim, ortalama en yüksek dayanım değerini %23 ve elastisite modülünü ise %19 oranında arttırmıştır. Ayrıca hücre yüksekliği ve radyus değerlerini değiştirmenin de basma özellikleri üzerindeki etkisi bu çalışma ile ortaya koyulmuştur.

Al-Saedi vd. [93] çalışmalarında, SLM eklemeli üretim yöntemi kullanarak Al-12Si alüminyum alaşım malzemesinden ürettikleri, kademeli olarak değişken yoğunluğa sahip F2BCC kafes yapılarının basma durumundaki mekanik özelliklerini ve enerji yutma kapasitesini araştırmışlardır. Deneysel testler ve sonlu elemanlar analizi kullanarak elde ettikleri sonuçlara göre, kademeli olarak değişken yoğunluğa sahip numuneler, sabit yoğunluğa sahip numunelere kıyasla farklı deformasyon davranışı sergilemiştir. Sabit yoğunluğa sahip yapılarda, basma durumunda kırılma 45 derecelik

kayma gerilmesi yönünde çapraz bir şekilde meydana gelirken, kademeli olarak değişken yoğunluğa sahip yapılarda deformasyon, düşük yoğunluğa sahip tabakadan başlayarak devam etmiştir. Ayrıca bu çalışma sonucunda, kademeli olarak değişken yoğunluğa sahip yapıların, sabit yoğunluğa sahip yapılara göre daha fazla enerji emdiği gözlemlenmiştir.

Solmaz vd. [94] çalışmalarında, altıgen bal peteği hücre yapısına sahip sandviç kompozitler için basma kuvvetinin, kritik burkulma yüküne, özgül dayanım değerlerine ve numunelerde oluşan hasar tiplerine etkisini incelemiştir. Kompozit yapıların yüzey plakaları tabakalı kompozit (polyester/cam fiber) kullanılarak üretilmiş olup, çekirdek kısmında kullanılan hücresel petek yapıları ise ABS ve PLA termoplastik malzemeleri kullanılarak EYM eklemeli üretim yöntemi ile üretilmiştir. Farklı hücre boyutlarına ve hücre yüksekliklerine sahip sandviç yapıları numuneler, aksel basma kuvvetine maruz bırakılmıştır. Yapılan basma testleri sonucunda elde edilen burkulma yük değerlerinin numunelerin ağırlığına oranlanmasıyla, özgül kritik burkulma yük değerleri grafikler halinde sunulmuştur. Yapılan bu çalışma ile hücre yoğunluğundaki artışın kritik burkulma yük değerini arttırdığı, bunun tam tersine hücre yüksekliğindeki artışın ise kritik burkulma yükünü azalttığı görülmüştür.

Li vd. [95] yapmış oldukları çalışmada, çekirdeği eklemeli üretim yöntemi ile oluşturulmuş kompozit yapıların eğilme davranışlarını incelemiştir. Çekirdek bölümünde kullanılan; truss, geleneksel bal peteği ve re-entrant bal peteğinden (auxetic) oluşan yapılar, PJ eklemeli üretim yöntemi kullanılarak akrilik temelli bir fotopolimer olan VeroWhite malzemesinden üretilmiştir. Yüzey plakaları ise, dokuma karbon fiber takviyeli polimer (W-CFRP), tek yönlü karbon fiber takviyeli polimer (U-CFRP) ve VeroWhite malzemelerinden üretilmiştir. İki adet yüzey plakası ve çekirdeğin birbirlerine epoksi içerikli yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle eğme numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere yapılan üç nokta eğme testi sonucunda, yapıların eğilme rijitliği, eğilme dayanımı ve enerji yutma kabiliyetleri belirlenmiştir. Bahsedilen mekanik özelliklerin, izafi yoğunluk, hücre topolojisi ve yüzey plakası malzemesine göre değişimi rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüzey plakası tek yönlü karbon fiber takviyeli polimerden (U-CFRP) oluşan numune VeroWhite malzemesinden üretilen numuneye kıyasla çok daha fazla eğilme dayanımına, eğilme rijitliğine ve enerji yutma kabiliyetine sahiptir. Ayrıca hücre topolojisinin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde, truss birim hücrelerinden oluşturulan yapının en

yüksek eğme dayanımına ve rijitliğe, re-entrant bal peteğinden oluşturulan yapının da en yüksek enerji yutma yeteneğine sahip olduğu yapılan bu çalışma neticesinde görülmüştür.

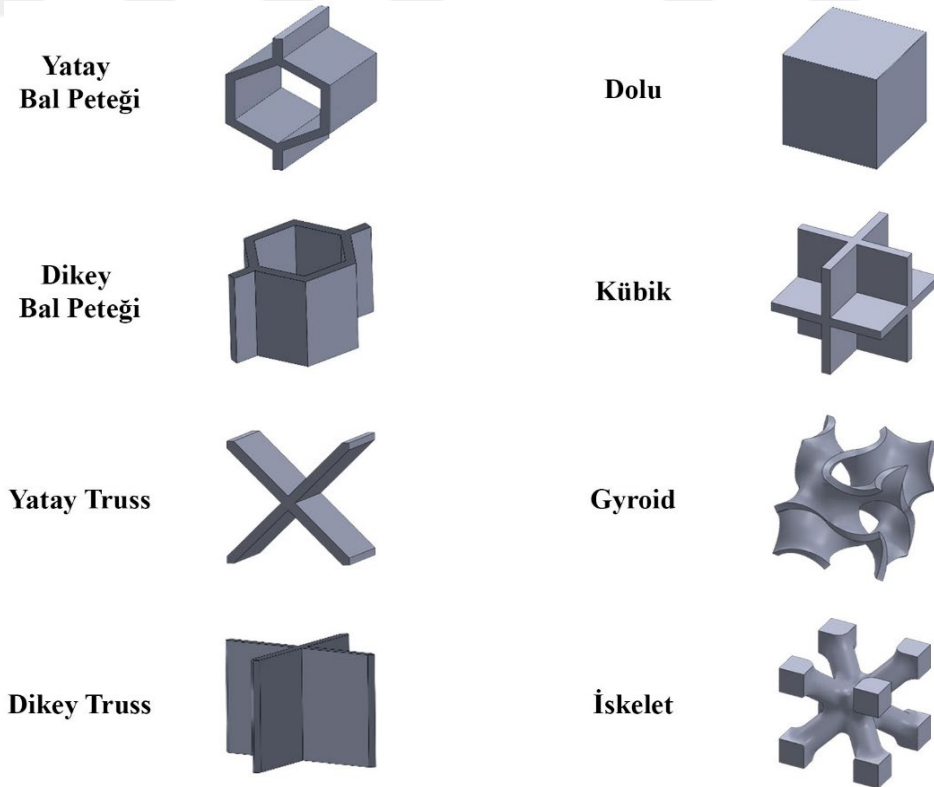


3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Numunelerin Tasarımı

3.1.1 Birim hücrelerin tasarımı

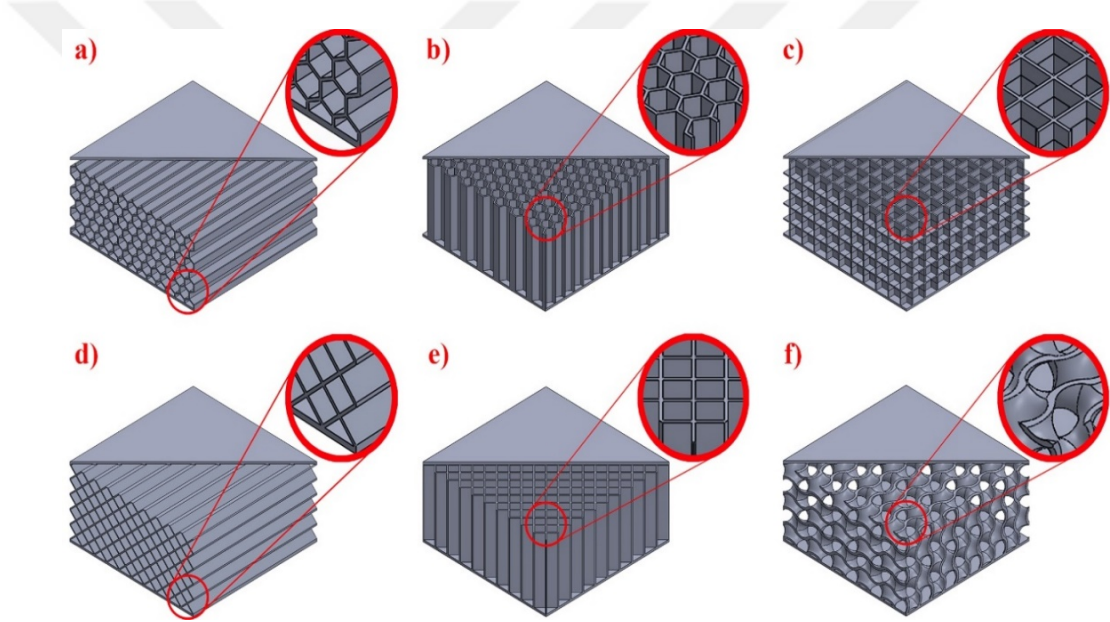
Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan birim hücre şekilleri, Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Kullanılan birim hücre şekilleri; yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, auxetic, kübik, gyroid, iskelet ve dolu olarak sıralanabilir. Yukarıda isimleri geçen sekiz farklı birim hücrenin tamamı 5mm×5mm×5mm olmak üzere eşit boyutlarda tasarlanmıştır. Birim hücre boyutlarını değiştirmeksizin sadece hücre kalınlıkları değiştirilerek, birim hücrelerin izafi yoğunlukları %20, %40, %60 olacak şekilde ayarlanmıştır. Farklı şekillere ve izafi yoğunluklara sahip tüm birim hücre tasarımları, Solidworks bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.1 : Kullanılan birim hücre şekilleri (%20 izafi yoğunluk için)

3.1.2 Basma numunelerinin tasarımı

Bu tez çalışmasının basma özelliklerinin belirlenmesi ile alakalı olan kısmında, %20, %40 ve %60 farklı izafi yoğunluklara sahip basma numuneleri üretilmiştir. Basma numunelerinin çekirdek kısmında, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücre şekilleri kullanılmıştır. Altı farklı birim hücrenin her birinin dıştan dışa ölçüleri, 5mm×5mm×5mm olacak şekilde eşit olarak tasarlanmıştır. Alt ve üst plakalar 50mm×50mm×1mm ve çekirdek bölümü ise 50mm×50mm×25 mm olmak üzere; sandviç yapıdaki basma numunelerinin boyutları toplamda 50mm×50mm×27mm değerindedir. Şekil 3.2, %40 izafi yoğunluğa sahip altı farklı birim hücrenin sandviç panellerin çekirdeğinde kullanılmasıyla oluşturulmuş basma numunelerini gösterilmektedir.



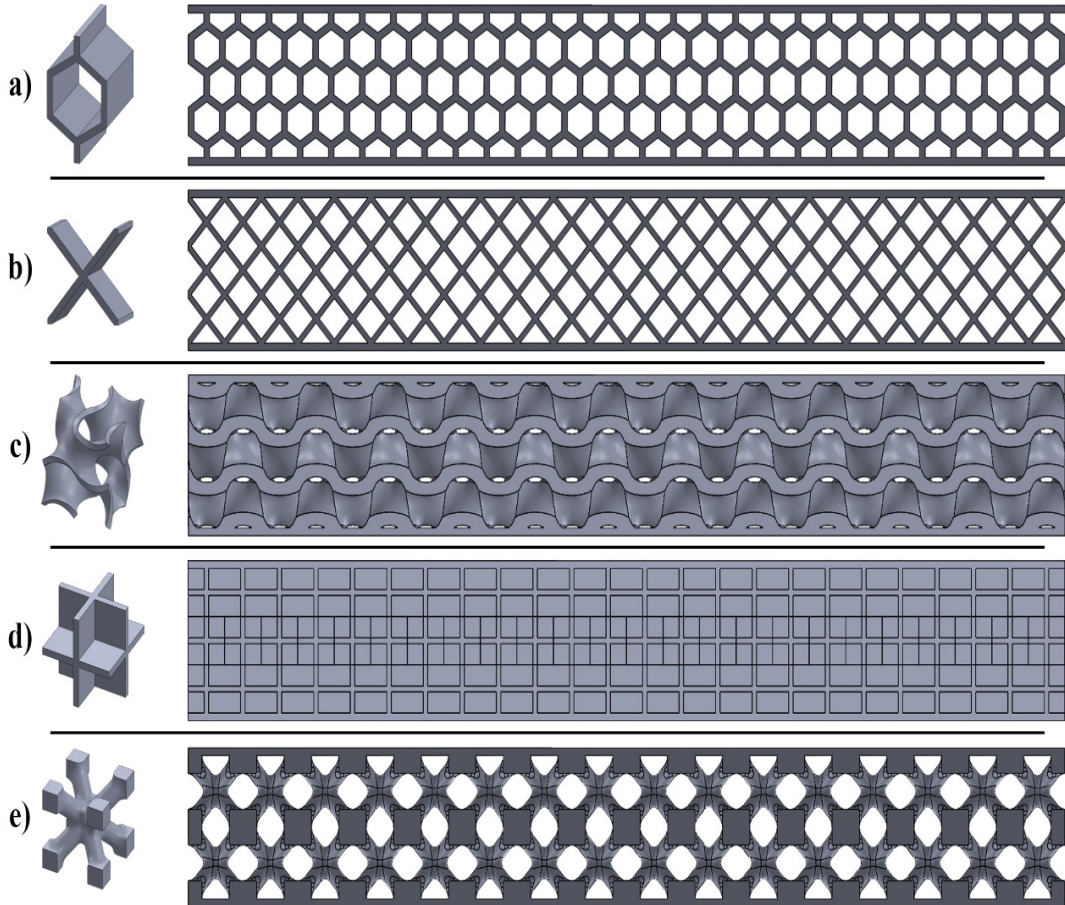
Şekil 3.2 : %40 izafi yoğunluğa sahip, altı farklı birim hücreden oluşturulmuş basma numuneleri, a) yatay bal peteği, b) dikey bal peteği, c) kübik, d) yatay truss, e) dikey truss, f) gyroid

İzafi yoğunluk, hücresel malzemelerin mekanik davranışlarını karakterize etmek için kullanılan en önemli özelliklerden biri olarak bilinmektedir. İzafi yoğunluğu değiştirmenin birkaç farklı yolu olmasına rağmen bu çalışmada izafi yoğunluk değerleri, birim hücre boyutlarını(5mm×5mm×5mm) değiştirmeden sadece hücre kalınlıklarının değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. İzafi yoğunluk kavramı ikinci bölümde, hücresel yapının mevcut ağırlığının hücresel yapının içi dolu olması durumundaki ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada hücre topolojisinin ve izafi yoğunluk kavramının basma özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlandığından

dolayı yapılan tasarımlar, altı farklı birim hücre şeklini ve üç farklı izafi yoğunluk (%20,40,60) değerini içerecek şekilde yapılmıştır.

3.1.3 Eğme numunelerinin tasarımı

Periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç eğme numunelerinin, eğme özelliklerinin ve eğme davranışlarının belirlenebilmesi için %40 izafi yoğunluğa sahip sandviç eğme numuneleri üretilmiştir. Üretilen periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç eğme numunelerinin tasarımı Solidworks bilgisayar destekli tasarım programı ile yapılmıştır. Sandviç yapıların çekirdeğinde, yatay bal peteği, yatay truss, gyroid, kübik ve iskelet birim hücre şekilleri kullanılmıştır. Tüm birim hücrelerin boyutları 5mm×5mm×5mm olacak şekilde eşit ölçüdedir. Periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç eğme numunelerinin boyutları 120mm×15mm×16.5mm olarak belirlenmiştir. 16.5mm kalınlığa sahip eğme numuneleri için çekirdeğin kalınlığı 15mm iken, alt ve üst plakaların kalınlıkları 0.75mm'dir. Şekil 3.3, %40 izafi yoğunluğa sahip, beş farklı birim hücre kullanılarak oluşturulmuş eğme numunelerini göstermektedir.



Şekil 3.3 : %40 izafi yoğunluğa sahip, beş farklı birim hücreden oluşturulmuş sandviç panel tasarımları, a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) kübik, e) iskelet

3.2 Numunelerin Üretimi

3.2.1 Çekme numunelerinin üretimi

Çekme numuneleri, ASTM D638 test standardında (plastik malzemelerin çekme özellikleri için test metotları standardı) yer alan, tip1 numunesi için belirtilen ölçülere uygun olarak oluşturulmuştur [96]. Numuneler Şekil 3.4’de gösterilen Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısı kullanılarak, PLA ve CFR-PLA malzemelerinden 200, 210, 220 ve 230 °C işleme sıcaklıklarında üretilmiştir. Diğer işleme parametreleri ise Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

3.2.2 Basma numunelerinin üretimi

Basma özelliklerini belirlemek için üretilen basma numunelerinin boyutları, ASTM C365/C365M (Sandviç çekirdeklerinin basma özellikleri için test metodları) test standardında belirtildiği şekilde, tanımlanan kısıtlamalara uygun olarak 50mm×50mm×27mm seçilmiştir [97]. Çekirdeğin boyutları 50mm×50mm×25mm, alt ve üst plakaların boyutları ise 50mm×50mm×1mm’dir. Basma numunelerinin üretiminde, EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılmıştır. Numuneler, Ultimaker/3 Extended eklemeli üretim cihazı ile üretilmiştir. Numunelerin üretildiği Ultimaker/3 Extended cihazı Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



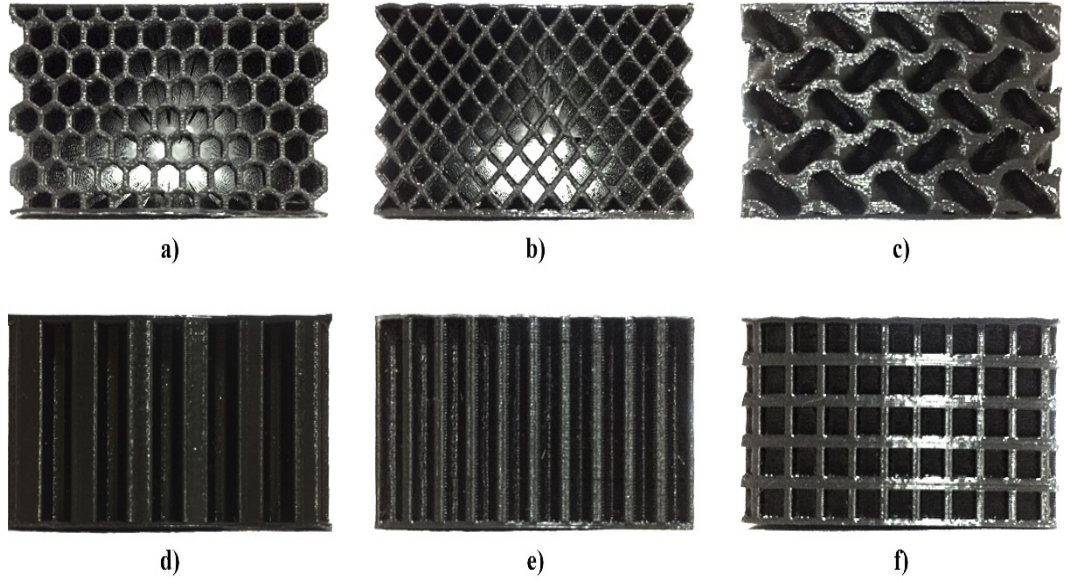
Şekil 3.4 : Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısı.

Basma numunelerinin üretiminde, polilaktik asit (PLA) ve %15 oranında karbon fiber içeren polilaktik asit (CFR-PLA) olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Frosh ticari markası tarafından piyasaya sürülen PLA ve CFR-PLA filamentlerinin, önerilen işleme sıcaklığı değerleri, ürün kataloğunda sırasıyla 190-230 °C ve 200-230 °C olarak belirtilmiştir. Her iki malzeme içinde, en uygun işleme sıcaklığı aralığının belirlenmesi amacıyla 200, 210, 220 ve 230 °C işleme sıcaklıklarında çekme numuneleri üretilmiş ve yapılan çekme testleri sonucunda en yüksek çekme dayanımına sahip numuneler için o sıcaklık değeri, işleme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Tablo 3.1, PLA ve CFR-PLA için işleme parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3.1 : PLA ve CFR-PLA malzemeleri için işleme parametreleri

İşleme Parametreleri	PLA	CFR-PLA
İşleme sıcaklığı (°C)	220 °C	210 °C
Tabla sıcaklığı (°C)	60 °C	60 °C
Katman kalınlığı (mm)	0.2 mm	0.2 mm
Doluluk oranı (%)	%100	%100
Akış oranı (%)	%106	%96
İşleme hızı (mm/s)	70 mm/s	50 mm/s
Filament çapı (mm)	2.85 mm	2.85 mm

Çizelge 3.1’de belirtilen işleme parametreleri kullanılarak, Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısı ile üretilen basma numuneleri, Şekil 3.5’de gösterilmektedir. Basma numuneleri, Çizelge 3.1’de belirtilen işleme parametreleri kullanılarak %20, 40, 60 olmak üzere üç farklı izafi yoğunluk değerinde üretilmiştir. Basma numunelerinin üretiminde, PLA ve CFR-PLA malzemeleri kullanılmıştır. Ayrıca basma numunelerinde yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücre şekilleri olmak üzere altı farklı birim hücre şekli kullanılmıştır. Farklı birim hücreler kullanılarak, PLA malzemesinden %40 izafi yoğunluk değerinde üretilen basma numuneleri Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



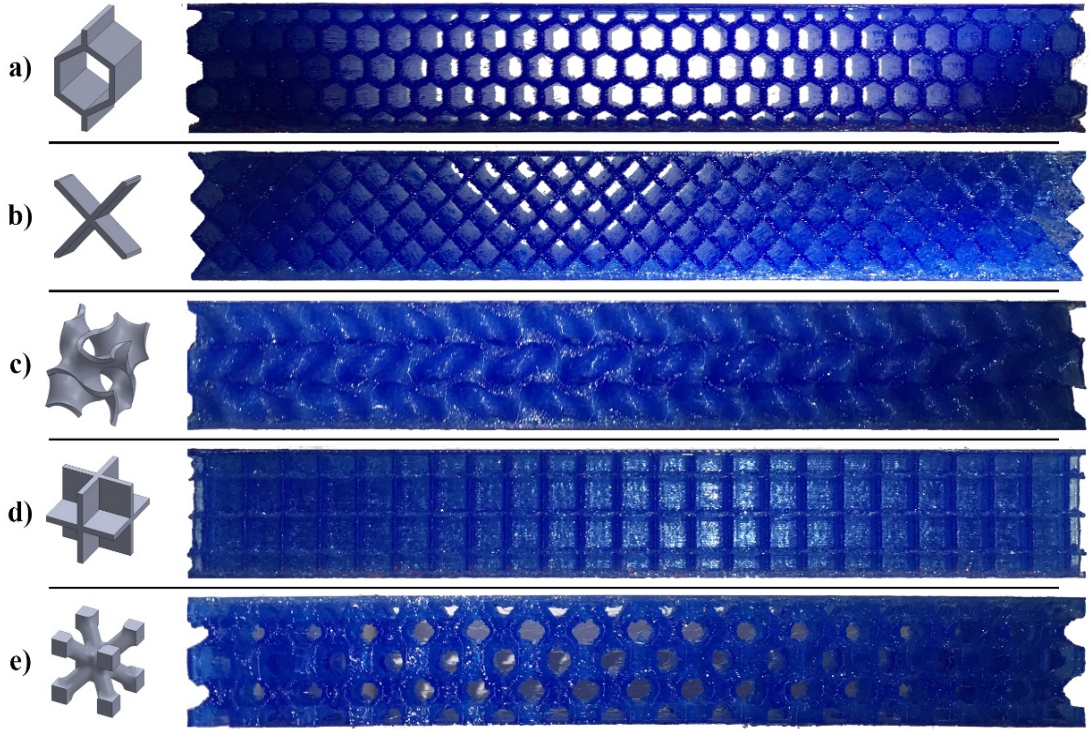
Şekil 3.5 : Eriyik yığma modelleme yöntemi ile PLA malzemesinden üretilmiş farklı hücre şekillerine sahip basma numuneleri, a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) dikey bal peteği, e) dikey truss, f) kübik

3.2.3 Eğme numunelerinin üretimi

Bu tez çalışmasında, periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç yapıların eğme özelliklerinin belirlenmesi ile alakalı olan kısımda sandviç yapı iki farklı şekilde üretilmiştir. İlk yöntemde, periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç paneller sadece EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiştir. İkinci yöntemde ise, EYM ile üretilen sandviç paneller ile vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen dokuma karbon fiber plakalar epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve kompozit sandviç eğme numuneleri üretilmiştir.

3.2.3.1 Eğme numunelerinin eriyik yığma modelleme yöntemi ile üretilmesi

%40 izafi yoğunluğa sahip olan sandviç paneller EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak, Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısında üretilmiştir. Bu bölümde üretilen sandviç panellerin çekirdek kısmında, yatay bal peteği, yatay truss, gyroid, kübik ve iskelet birim hücre şekilleri kullanılmıştır. Üretilen numunelerin boyutları 120mm×15mm×16.5mm'dir. Malzeme olarak, Frosch markası tarafından üretilen 2.85 çapına sahip PLA filament kullanılmıştır. PLA malzemesine ait işleme parametreleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir. Tüm yapının EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak üretildiği numunelere ait resimler, Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Eriyik yığma modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş farklı hücre şekillerine sahip sandviç eğme numuneleri; a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) kübik, e) iskelet

3.2.3.2 Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak sandviç kompozit eğme numunelerin üretilmesi

Sandviç kompozit eğme numenelerinin hazırlandığı bu bölümde numuneler; Şekil 3.6'da gösterilen sandviç paneller ile vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen karbon fiber kompozit plakaların birbirlerine epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Sandviç kompozit yapının alt ve üst plakaları dokuma karbon fiber malzeme kullanılarak vakum infüzyon yöntemiyle üretilirken çekirdek kısmı ise EYM yöntemiyle üretilmiştir.

Vakum infüzyon yöntemi, 1980'li yılların başından beri başta A.B.D. olmak üzere tüm dünyada farklı endüstri dallarında uygulanmakta olan bir kompozit imalat yöntemidir. Vakumlu ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntemde, imalat hazırlıkları tamamlanmış ürünün el değmeden üretimi amaçlanmaktadır [98]. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretiminde, takviye elemanı ve matris malzemesi kompozit yapının mekanik özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden ikisidir. Kompozit yapılarda, dayanım ve sertlik takviye elemanı tarafından sağlanırken, yapısal bütünlük ve yüklerin elyaflar arasında dağılması matris görevi yapan reçine tarafından sağlamaktadır [99]. Bu çalışmada takviye elemanı olarak, 245 gr/m²

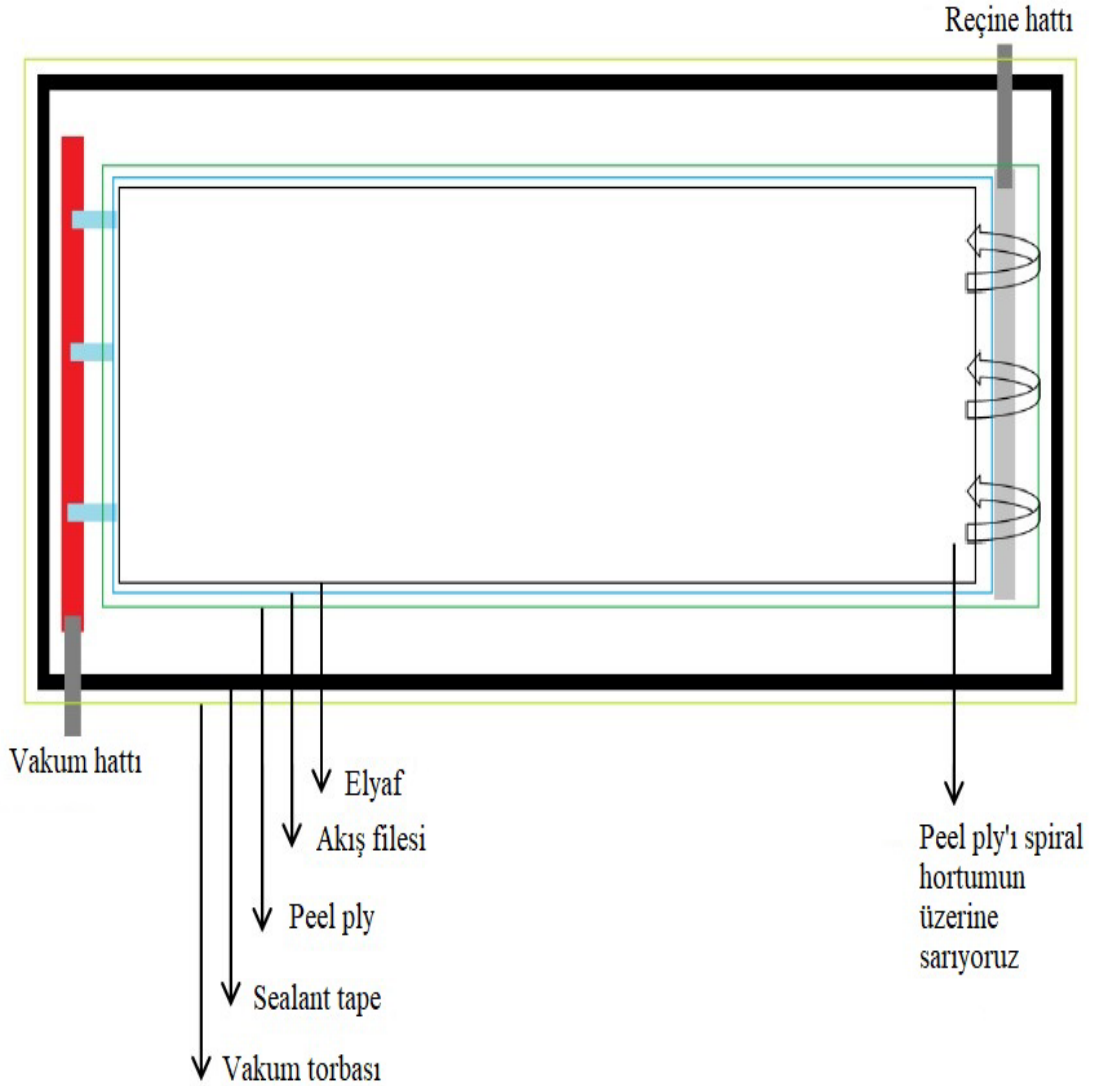
yoğunluğa sahip 3k twill desenli dokuma karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise epoksi reçine kullanılmıştır.

Aşağıda vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiş, periyodik hücresel çekirdeğe sahip sandviç kompozit yapıların üretim aşamaları detaylı bir şekilde anlatılmaktadır [100].

1. Üretimin yapılacağı cam ıslak bez ile temizlenir ve daha sonra kuru bir bez ile silinerek kurutulur.
2. 245 gr/m² yoğunluğa sahip, 3k twill desenli dokuma karbon fiber kumaşlar, üretilmek istenilen parçanın boyutuna uygun olarak kesilir. Eklemeli imalat ile üretilen periyodik hücresel çekirdeğe sahip eğme numunelerinin alt ve üst plakalarında kullanılacak olan karbon fiber plakaların boyutları 120mm×15mm'dir. Ancak karbon fiber kumaşlar, her bir üniteden altı adet eğme numunesi plakası çıkacak şekilde 300mm×75mm boyutunda kesilmiştir. 300mm×75mm boyutunda üretilen karbon fiber kompozit plakalar daha sonra istenilen ölçü olan 120mm×15mm boyutunda kesilmiştir.
3. Kompozit üretimi yapılacak cam yüzeye, yumuşak olmayan ve toz bırakmayan bir bezle wax sürülür. Üç kat wax sürülmesi yeterlidir.
4. 300mm×75mm boyutunda kesilen karbon fiber elyaflar sıralı bir biçimde üst üste sekiz kat olacak şekilde wax sürülen alana serilir.
5. Üst üste serilen karbon fiber elyafların etrafına, bir miktar pay olacak şekilde "sealant tape" yani sızdırmaz vakum macunu yapıştırılır.
6. Camın yüzeyine yerleştirilen karbon fiber elyafların üzerine "peel ply" serilir. "Peel ply", kompozit üzerinde bir texture oluşturmak ve vakum torbası ile akış filesini üretilen parçadan rahatça ayırmak için kullanılmaktadır.
7. Reçinenin akışını sağlayacak reçine hattı için normal şeffaf hortum ve spiral hortum kullanılır. Şeffaf hortum ile spiral hortum uçlarından birbirlerine bağlanır. Spiral hortum peel ply'nin üzerine konumlandırılır ve çözülmesin diye bant ile yapıştırılır.
8. Akış filesi, karbon fiber elyaf boyutlarından bir miktar büyük olacak şekilde kesilir ve peel ply'nin üzerine yerleştirilir. Peel ply'a bantlanmış spiral hortum bantlarla

akış filesine yapıştırılır. Akış filesi, peel ply'a yapıştırılan spiral hortuma temas ettirilmelidir.

9. Vakum hattı reçine hattının tam karşı kenarına kurulur. Vakum hattında şeffaf ve spiral hortum kullanılır. Şeffaf hortum uç kısmından spiral hortum ile birleştirilir ve cam yüzeye bant ile tutturulur. Daha sonra şeffaf hortumun sealant tape üzerinden geçecek kısmına bir tur sealant tape daha sarılarak, cam yüzeyin etrafına yapıştırılan sealant tape'in üzerine yapıştırılır.
10. Son aşamaya getirilen sistemin üzeri herhangi bir noktadan sistemin içerisine hava girmeyecek şekilde vakum torbası ile kapatılmıştır. Hortumların geçtiği bölgelerde ve köşelerde boşluk kalmamasına özellikle dikkat edilmelidir. Vakum infüzyon yöntemi için şematik gösterim Şekil 3.8'de verilmiştir.



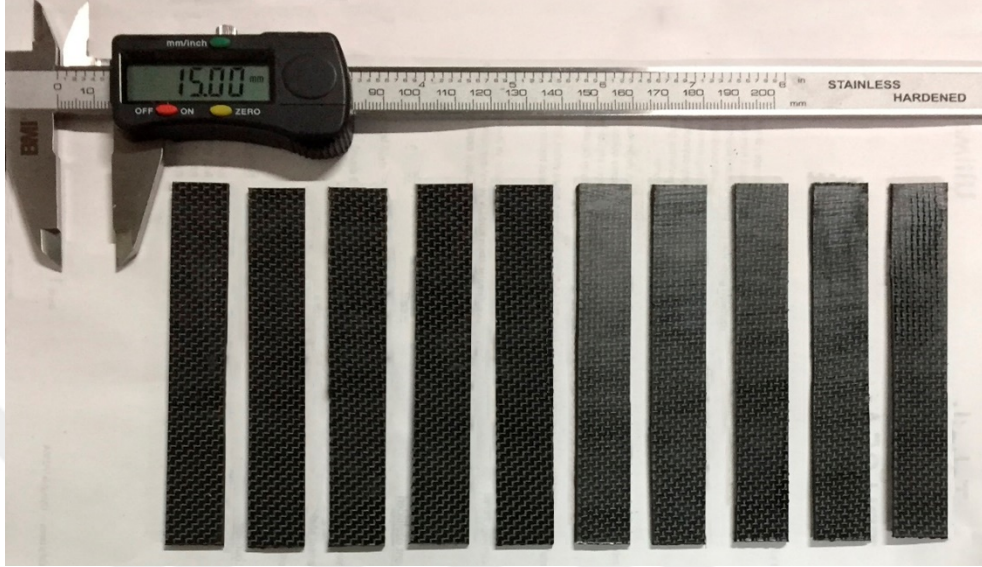
Şekil 3.7 : Vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi [100]

Üretim için hazır hale getirilen sistem kurulduktan sonra, kullanılacak olan reçine hazırlanmıştır. Kompozit yapının matris malzemesinde epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçinenin kullanım tavsiyesine uyularak; ağırlıkça %66 epoksi ile %34 oranında sertleştirici yaklaşık 10 dakika boyunca karıştırılarak vakum infüzyon yöntemi için reçine hazırlanmıştır. Bu işlemde 500 gram epoksi reçine ile 250 gram sertleştirici olmak üzere toplamda 750 gram reçine kullanılmıştır.

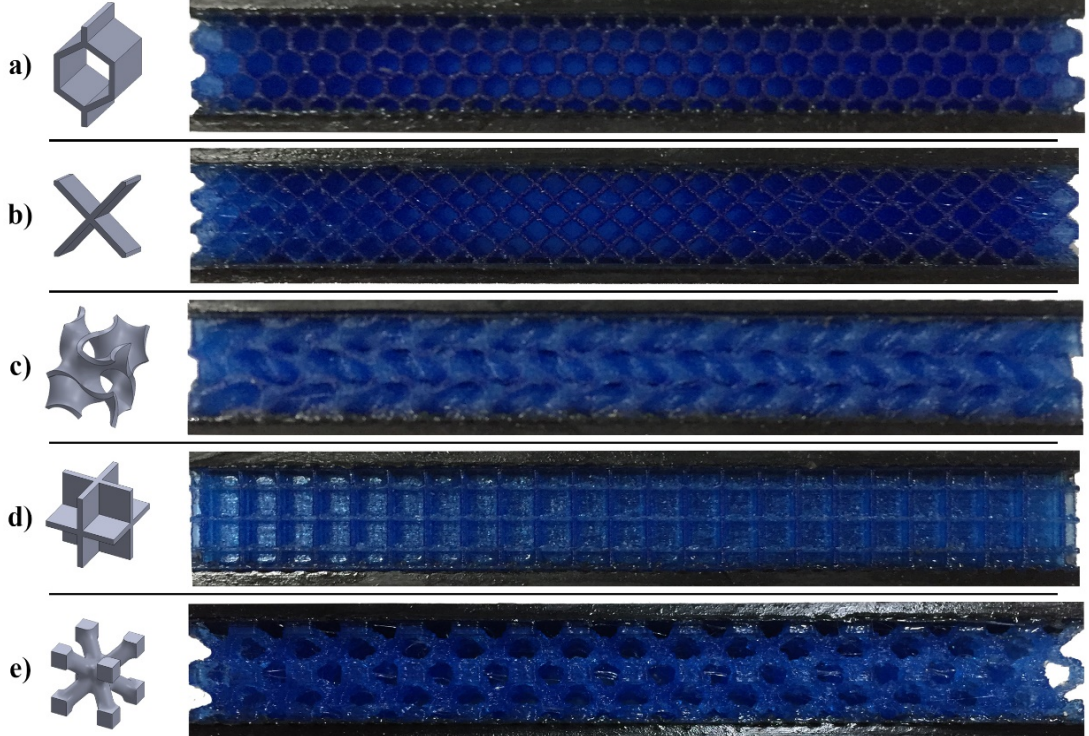
11. Vakum torbası sealant tape ile yapıştırıldıktan ve reçine hazırlandıktan sonra vakum pompası çalıştırılarak karbon fiber elyafların üzerindeki hava vakumlanır. Vakum torbasında hava kaçağı olup olmadığı, sisteme reçine emdirilmeden önce kontrol edilir. Hava kaçağı olması durumunda, kaçağın olduğu tespit edilen noktalar sealant tape ile kapatılır. Hava kaçağı olmadığından emin olunduktan sonra, vakum torbası vakum filesine yapışacak biçimde vakumlanır
12. Hazırlanan reçine, reçine hattının ucunda bulunan hortumun içine daldırılır. Vakum başlatılarak, önce vakum hattında bulunan vana daha sonra reçine hortumunda kapalı durumda bulunan vana açılarak reçine akışı başlatılır. Reçinenin daldırıldığı hortumun kesinlikle reçineden dışarıya çıkmaması gerekmektedir.
13. Vakumun açılmasıyla birlikte reçinenin karbon elyaflar üzerinde ilerleyişi gözlemlenir. Karbon elyafların tüm hacminin reçine ile kaplanmasından sonra, reçine akışını sağlayan hortumun vanası kapatılır.
14. Vakum pompası yaklaşık 1 saat çalıştırdıktan sonra kapatılır. Vakum pompası kapatılmadan hemen önce, vakum hortumunun ucunda bulunan vana kapatılır.
15. Üretimi gerçekleştirilen kompozit yaklaşık 2 gün bekletilerek reçinenin kürleşmesi beklenir. Daha sonra dikkatli bir biçimde peel ply ile kompozit yapı birbirinden ayrılır.

Üretilen karbon fiber kompozit plakalar Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Üretilen kompozit plakalar kürleştikten sonra 120mm×15mm boyutunda kesilmiştir. 8 kat karbon fiber elyafların üst üste konularak vakum infüzyon yöntemiyle üretilmesi sonucunda elde edilen numunelerin kalınlığı 2,5 mm’dir. Kesilen karbon fiber plakalar, Şekil 3.6’da gösterilen EYM yöntemi kullanılarak üretilmiş eğme numunelerinin alt ve üst yüzeylerine Şekil 3.9’da gösterildiği biçimde yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi bir fırça yardımıyla, epoksi reçine ve sertleştiricinin

karıştırılmasıyla elde edilen reçine kullanılarak yapılmıştır. Yapıştırılan karbon fiber plakalar ve eğme numuneleri bir mengene ile sıkıştırılarak 2 gün bekletildikten sonra mengene açılmıştır. 8 kat karbon fiber elyafın kullanılmasıyla üretilmiş kompozit plakanın kalınlığı 2.5 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8 : Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiş karbon fiber kompozit plakalar

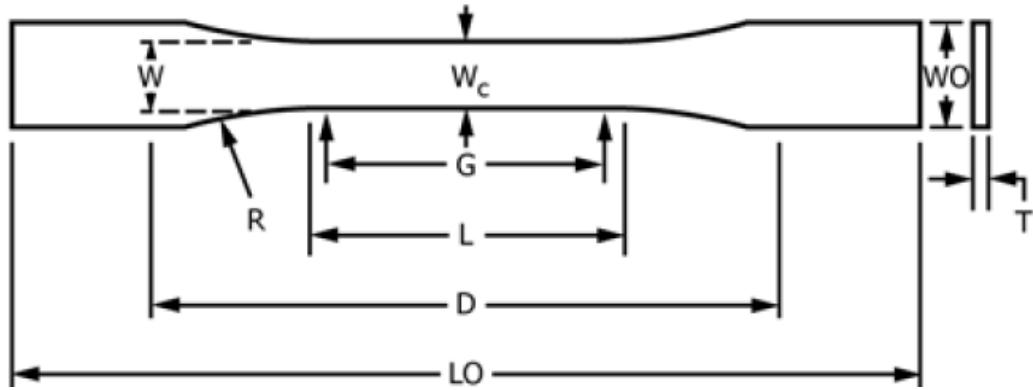


Şekil 3.9 : Periyodik hücreli çekirdeğe sahip, karbon fiber plaka takviyeli sandviç kompozit yapılar; a) yatay bal peteği, b) yatay truss, c) gyroid, d) kübik, e) iskelet

3.3 Mekanik Testler

3.3.1 Çekme testi

Rijit olmayan bir malzemeye kuvvet uygulanması durumunda, malzemede deformasyon meydana gelir ve bunun neticesinde malzeme şekil ve boyut değişikliğine uğrar. Bir malzemenin mekanik özelliklerini anlayabilmek için çeşitli mekanik testler yapılmaktadır. Bu test yöntemleri arasında en önemli test yöntemlerinden biriside çekme deneyidir. Bir malzemeye çekme deneyi yapmanın temel amacı; statik yükleme durumunda oluşan elastik ve plastik davranışı karakterize etmek ve belirlemektir [101]. Bu tez çalışmasında, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için en iyi mekanik özelliklerin gözlemlendiği işleme sıcaklığını bulabilmek için 200, 210, 220 ve 230 °C farklı işleme sıcaklıklarında, EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak çekme numuneleri üretilmiştir. Çekme numuneleri, ASTM D638 test standardında (plastik malzemelerin çekme özellikleri için test metotları standardı) yer alan tip1 numune boyutu referans alınarak oluşturulmuştur. Tip 1 örnek çekme numunesine ait ölçülendirme Şekil 3.10'da gösterilmektedir [96].



Şekil 3.10 : ASTM D638 test standardında yer alan tip1 numunenin boyutlandırması [96]

Standartta belirtilen boyutlarda üretilen deney numunesi, çekme test cihazına bağlanarak aksenal ve değişken kuvvetlere maruz bırakılır. Çekme cihazı, aşağı ve yukarı yönlerde hareket edebilen deney numunesinin bağlandığı iki adet çene ve çenelere hareket veya kuvvet veren, şekil değişimi ve kuvvet miktarını ölçen ünitelerden oluşur. Çekme testi esnasında, çenelerden biri sabit bir hız ile hareket ettirilir ve çekme numunesine değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır. Uygulanan bu çekme kuvvetine karşılık gelen uzama miktarı sensörler yardımıyla ölçülerek kaydedilir.

Çekme testi uygulanan malzeme için ölçülen boyut değişimi ve kuvvet miktarına göre, gerilme-birim şekil değiştirme grafiği oluşturulur. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, malzemeye ait birçok mekanik özelliğin elde edilmesine yardımcı olur. Denklem 3.1, birim alana etkileyen yük miktarını ifade eden, gerilmenin (σ) hesaplanmasını göstermektedir. Denklem 3.2, malzemeye kuvvet uygulanması durumunda meydana gelen boy değişiminin, kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy oranını ifade eden birim şekil değişiminin (e) hesaplanmasını göstermektedir. Denklem 3.3, gerçek şekil değişimini (ε) göstermektedir. Denklem 3.4, elastik bölgede meydana gelen birim uzama ile gerilmenin doğrusal bir ilişkiye sahip olduğunu ifade eden elastisite modülünün (E) hesaplanmasını göstermektedir. Denklem 3.5, malzemenin kırılmaya veya kopuncaya kadarki dayanabileceği en yüksek gerilme değeri olan, çekme dayanımının (σ_{ζ}) hesaplanmasını göstermektedir. Ayrıca, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden faydalanılarak malzemeye ait, poisson oranı (ν), elastiklik sınırı (ε_e), akma dayanımı (σ_a), kalıcı şekil değişimi ve pekleşme, kopma uzaması (δ), kesit büzülmesi (φ), rezilyans ve tokluk gibi birçok mekanik özellik belirlenebilir.

$$\sigma = P/A_0 \quad (3.1)$$

$$e = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3.3)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\zeta} = P_{\max}/A_0 \quad (3.5)$$

Çekme testleri, Şekil 3.11 'de gösterilen SHIMADZU-AG-X PLUS 250 kN test cihazı ile yapılmıştır. PLA ve CFR-PLA malzemeleri kullanılarak, dört farklı sıcaklık değerinde üretilen çekme numuneleri, ASTM D638 test standardına uygun olarak 1 mm/dk çekme hızında çekilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına ait grafikler, bulgular ve tartışma bölümünde yer almaktadır.



Şekil 3.11 : Shimadzu-AG-X Plus 250 kN test cihazı

3.3.2 Basma testi

Periyodik hücresel çekirdeğe sahip sandviç yapıların basma özelliklerinin elde edildiği tek eksenli basma testi, ASTM C365/365M standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [97]. Altı farklı birim hücre şekli, üç farklı izafi yoğunluk değeri ve iki farklı malzeme kullanılarak oluşturulmuş toplam 36 farklı test numunesi basma testine tâbi tutulmuştur. Ayrıca, PLA ve CFR-PLA malzemesi kullanılarak üretilmiş %100 izafi yoğunluğa sahip basma numuneleri içinde basma testi yapılmıştır. 50mm×50mm×27mm boyutlarında üretilen test numunelerinin basma testleri, SHİMADZU-AG-X PLUS 250 kN cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma testlerinin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Tüm testler yarı statik (quasi-statik) şekilde, 0,5 mm/dk ilerleme hızında yapılmıştır. Tek eksenli sıkıştırma testi sonucunda elde edilen kuvvet - yer değiştirme grafiğinden elde edilen değerler, denklem 3.6 ve denklem 3.7’de gösterildiği şekilde hesaplanarak, basma gerilmesi - basma birim şekil değişimi grafiği olarak tekrardan düzenlenerek oluşturulmuştur. Basma testi ile elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal lineer elastik deformasyon bölgesindeki eğimi hesaplanarak, denklem 3.8’de gösterildiği gibi sandviç yapıların elastisite modülleri (E) bulunur. Doğrusal lineer elastik bölgenin bitiminde ulaşılan gerilme değerleri ise sandviç panellerin kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme değerleridir.

$$\sigma_b = P_i / A_0 \quad (3.6)$$

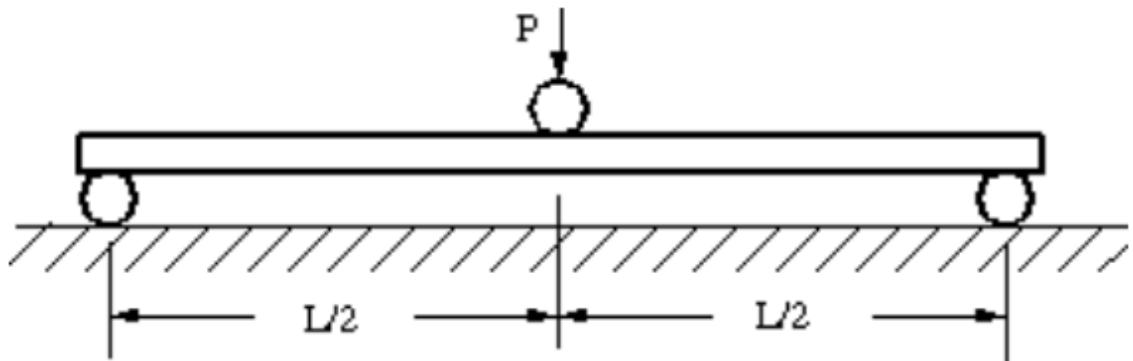
$$e_b = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.7)$$

$$E = \sigma / e \quad (3.8)$$

Denklem 3.6'de, σ_b : basma gerilmesi, P_i : basma yükü, A_0 : numunenin ilk kesit alanı, olarak ifade edilmektedir. Denklem 3.2'de ise, e_b : basma birim şekil değişimi, l_i : numunenin P_i yükü altındaki uzunluğu, l_0 : numunenin orijinal uzunluğu, Δl : numuneye P_i yükü uygulanması durumunda numunenin boyundaki kısalma miktarı olarak tanımlanır. Denklem 3.3'de, E : elastisite modülü, σ : elastik bölge içerisinde herhangi bir gerilme değeri ve e : söz konusu gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değişimi değeri olarak tanımlanır.

3.3.3 Eğme testi

Eğme testinin amacı, malzemede eğilme durumunda meydana gelen eğme dayanımı (σ_e), elastisite modülü (E), eğilme rijitliği (EI), eğilme miktarı (δ) gibi değerleri hesaplayarak, tasarım bilgilerini belirlemektir. Enine yük taşıyan kiriş gibi elemanlar eğilmeye maruz kalırlar. Eğilmeye maruz kalan kirişin her bölgesinde eğilme momentleri oluşur, buda eğilme gerilmelerinin oluşmasına sebebiyet verir [102]. Şekil 3.12'de eğilmeye maruz kalan bir kiriş için üç nokta eğme testinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.12 : Üç nokta eğme testinin şematik gösterimi [103]

Üç nokta eğme testi esnasında en yüksek eğilme momenti kirişin tam orta noktasında meydana gelir. Kirişin orta noktasında meydana gelen en yüksek eğilme momentinden dolayı en yüksek eğme gerilmesi de kirişin orta noktasında gözlemlenir. Bu yüzden üç

nokta eğme testinde kuvvet, numunenin tam orta noktasından etki ettirilir. Eğme testinde, artan F kuvvetine karşılık numunenin tam orta noktasında oluşan yer değiştirme değeri ölçülür. Ölçülen değerler sonucunda uygulanan kuvvete karşılık kuvvet- yer değiştirme grafiği elde edilir. Eğilme halindeki numunelerin, iç yüzeye yakın bölgelerinde basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgelerinde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Orta noktada meydana gelen en yüksek eğme momenti ve eğme gerilmesi sırası ile denklem 3.9 ve denklem 3.10'da gösterilmektedir.

$$M_e = P.L/4 \quad (3.9)$$

$$\sigma_e = M. y/I \quad (3.10)$$

Bu tez çalışmasında, periyodik hücresel çekirdeğe sahip sandviç eğme numunelerin eğme davranışlarının belirlenmesi için numunelere üç nokta eğme testi yapılmıştır. Eğme testi, ASTM C393/C393M standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [104]. Eğme testlerinin yapıldığı Shimadzu-AG-X Plus 250 kN test cihazı, Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Üretilen eğme numunelerinin uzunluğu 120 mm'dir. İki uç mesnet arası uzunluk olan span mesafesi ise 100 mm olarak seçilmiştir. Testler ASTM C393/C393M standardında belirtildiği üzere 0,5 mm/dk hızında yapılmıştır. Yapılan eğme testleri sonucunda, sandviç yapılara ait kuvvet- yerdeğiştirme grafikleri oluşturulmuş ve birim hücre şeklinin eğme davranışı üzerine etkisi yorumlanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Çekme Testi Sonuçları

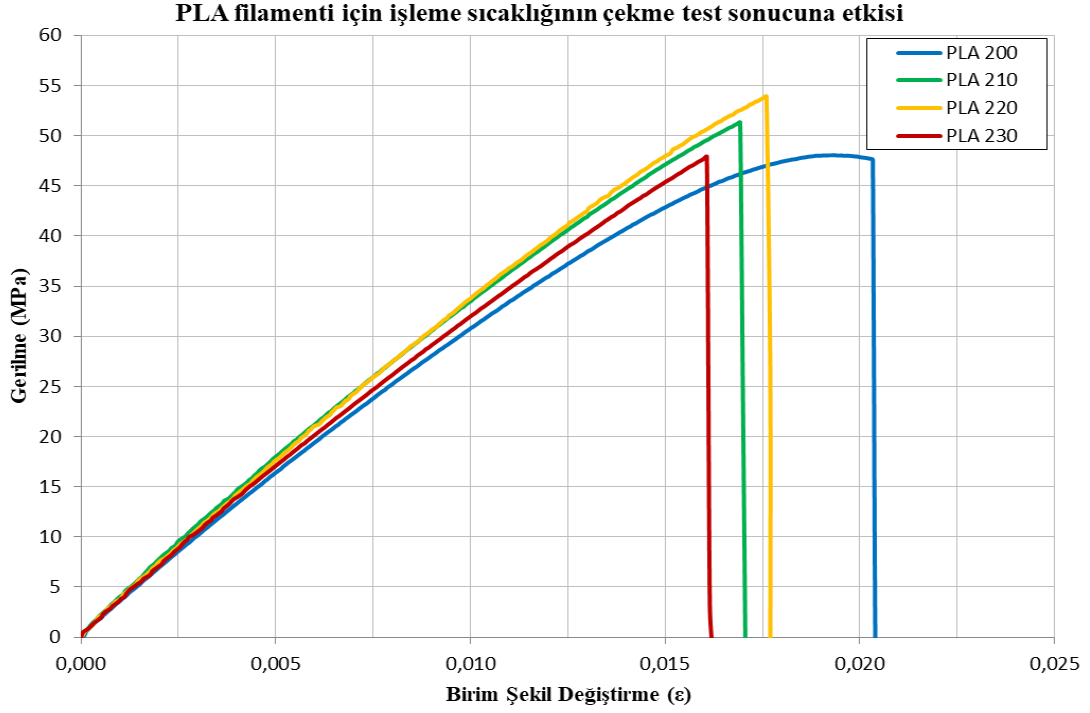
Bu bölümde PLA ve CFR-PLA filamenti için en yüksek çekme dayanımı değerinin hangi işleme sıcaklığı aralığında elde edildiği incelenmiştir.

4.1.1 PLA malzemesi için işleme sıcaklığı değişiminin çekme özellikleri üzerine etkisi

EYM eklemeli üretim yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin işleme parametreleriyle doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. EYM eklemeli üretim yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için işleme parametrelerinin optimize edilmesi iyi bir çözüm sunmaktadır. Önceki bölümlerde, farklı işleme parametrelerinin değiştirilmesinin mekanik özelliklere etkisi üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu işleme parametrelerinin en önemlilerinden biride işleme sıcaklığıdır. Frosch ticari markası tarafından üretilen PLA filamenti için önerilen işleme sıcaklığı aralığı 190-230 °C olarak tavsiye edilmektedir. Verilen bu işleme sıcaklığı aralığında en iyi çekme dayanımının hangi işleme sıcaklığında sağlandığının tespit edilebilmesi için PLA filamenti, Ultimaker 3 extended cihazında 200, 210, 220, 230 °C işleme sıcaklıklarında üretilmiştir.

Şekil 4.1'de PLA filamentinin Ultimaker 3 extended üç boyutlu yazıcısında farklı işleme sıcaklıklarında üretilmesi ile elde edilen numunelere yapılan çekme testi sonuçları gösterilmektedir. İşleme sıcaklığı olarak 200, 210, 220 ve 230 °C değerleri kullanılmıştır. Farklı işleme sıcaklıklarında üretilen PLA çekme numuneleri için çekme dayanımları 200 °C'den 230 °C'ye doğru sırasıyla, 48 MPa, 51,4 MPa, 53,9 MPa ve 47,6 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca farklı işleme sıcaklıklarında üretilen çekme numunelerinin elastisite modülleri 2,8 GPa ile 3,2 GPa arasında değerlere sahiptir. En yüksek elastisite modülü değerleri sırasıyla, 210 °C, 220 °C, 230 °C ve 200 °C sıcaklıklarında elde edilmiştir. Kopma uzamaları ise 200 °C'den 230 °C'ye doğru sırasıyla, %2,16, %1,99, %1,82, %1,73, %1,53 olarak sıralanmaktadır.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde PLA filamenti için en yüksek çekme dayanımı değerinin 220 °C işleme sıcaklığında elde edildiği görülmektedir. Bundan dolayı PLA filamentinin işleme sıcaklığı 220 °C olarak seçilmiştir. 220 °C işleme sıcaklığında üretilen numune için çekme dayanımı 53,9 MPa, elastisite modülü 3 GPa ve kopma uzaması ise %17,7'dir.



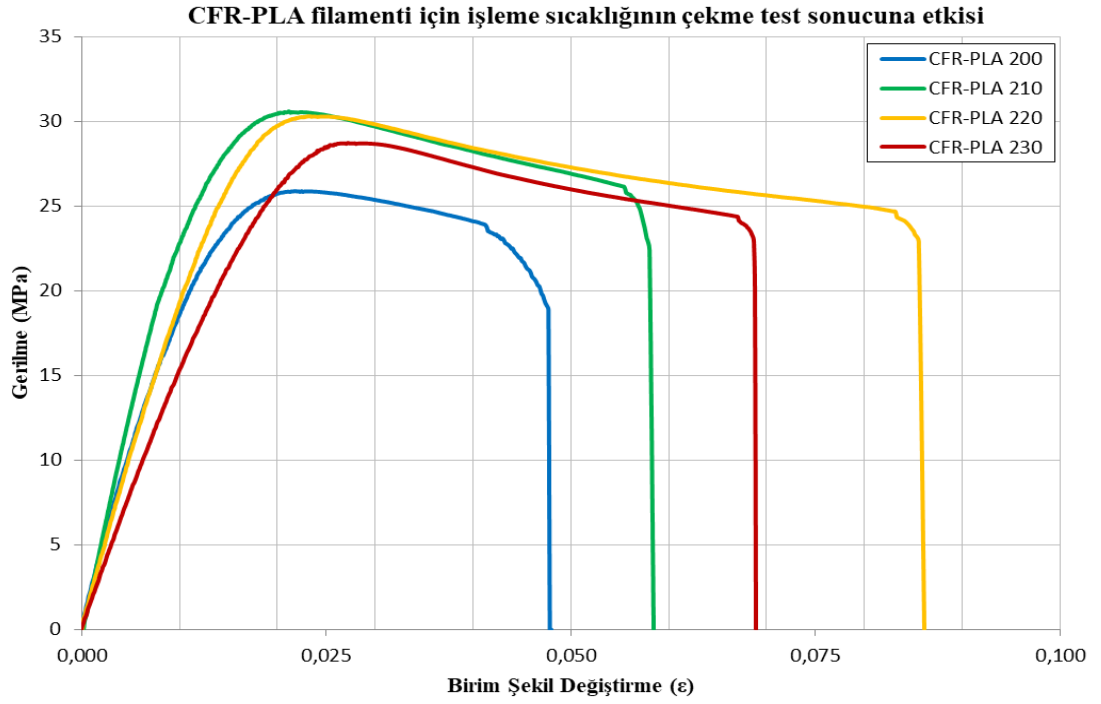
Şekil 4.1 : PLA filamenti için işleme sıcaklığının basma özelliklerine etkisinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmesi

4.1.2 CFR-PLA malzemesi için işleme sıcaklığı değişiminin çekme özellikleri üzerine etkisi

Frosch ticari markası tarafından üretilen CFR-PLA filamenti için önerilen işleme sıcaklık aralığı ürün kataloğunda 200-230 °C olarak tavsiye edilmektedir. Tavsiye edilen bu işleme sıcaklığı aralığında en iyi çekme dayanımının hangi işleme sıcaklığında sağlandığının tespit edilebilmesi için CFR-PLA filamenti, Ultimaker 3 extended cihazında 200, 210, 220 ve 230 °C işleme sıcaklıklarında üretilmiştir. Üretilen numunelere yapılan çekme testi sonucunda elde edilen, CFR-PLA filamenti için işleme sıcaklığının basma özelliklerine etkisi gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Şekil 4.2’de, farklı işleme sıcaklıklarında CFR-PLA filamenti için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde 200 °C’den 230 °C’ye doğru çekme dayanımları sırasıyla, 25,8 MPa, 30,5 MPa, 30,2 MPa ve 28,7 MPa olarak okunmuştur. Ayrıca

farklı işleme sıcaklıklarında üretilen çekme numunelerinin elastisite modülleri 1,7 GPa ile 2,6 GPa arasında değerlere sahiptir. Kopma uzamaları ise 200 °C'den 230 °C'ye doğru sırasıyla, %4,8, %5,8, %8,6 ve %6,8 olarak sıralanmaktadır. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde CFR-PLA malzemesi için işleme sıcaklığı 210 °C olarak belirlenmiştir. 210 °C işleme sıcaklığında üretilen numune için çekme dayanımı 30,5 MPa, elastisite modülü 2,6 GPa, kopma uzaması ise %5,8 olarak bulunmuştur.



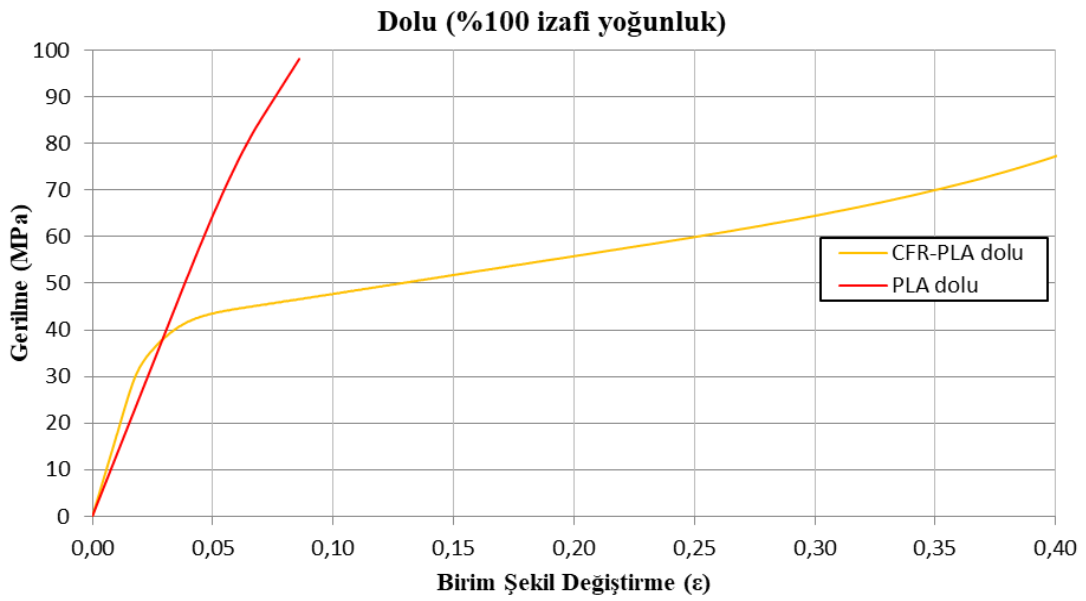
Şekil 4.2 : CFR-PLA filamentini için işleme sıcaklığının basma özelliklerine etkisinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmesi

4.2 Basma Testi Sonuçları

Bu bölümde, EYM eklemeli üretim yöntemi ile altı farklı birim hücre, üç farklı izafi yoğunluk ve iki farklı malzemenin kullanılmasıyla 50mm×50mm×27mm boyutunda üretilen basma numunelerine ait basma özellikleri incelenmiştir. Kullanılan yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücrelerinin boyutları 5mm×5mm×5mm olup eşittir. İzafi yoğunluk değerleri %20, %40 ve %60 olacak şekil seçilmiştir. Malzeme olarak ise PLA ve CFR-PLA kullanılmıştır. Basma özelliklerinin, birim hücre şekline, izafi yoğunluğa ve malzemeye bağlı değişimleri araştırılmıştır. Basma testleri, Shimadzu-AG-X Plus 250 kN test cihazı kullanılarak 0,5 mm/dk hızında yapılmış ve yapılan testler sonucunda, uygulanan kuvvete karşılık gelen şekil değişimleri elde edilmiştir. Elde edilen kuvvet – şekil değiştirme eğrileri gerilme – birim şekil değiştirme eğrilerine dönüştürülmüştür. Gerilme – birim şekil

değiştirme eğrisi üzerinde, rijitliğin ölçüsü olan elastisite modülleri ve elastik bölgede yapının kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme değerleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Şekil 4.3’de %100 izafi yoğunluğa sahip, yani tamamen dolu numunelere yapılan basma test sonuçları gösterilmektedir. PLA ve CFR-PLA için Şekil 4.1’de verilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinden her iki malzeme için elastisite modülleri hesaplanabilmektedir. %100 izafi yoğunluğa sahip PLA malzemesi için elastisite modülü 1300 MPa iken CFR-PLA için elastisite modülü 1650 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3 : %100 izafi yoğunluğa sahip PLA ve CFR-PLA için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

4.2.1 Basma özelliklerinin, birim hücre şekline bağlı değişimi

Hücreli kafes yapı basma numuneleri için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi bu bölümde, %20, 40 ve 60 izafi yoğunluk değerleri ve PLA ve CFR-PLA malzemeleri için ayrı ayrı incelenmiştir.

Hücreli yapıdaki basma numunelerinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, Şekil 2.2’de gösterilen hücreli yapılarda, basma yüklemesi durumunda üç farklı bölgenin meydana geldiği açıkça görülmektedir. Yapılan basma testleri sonucunda elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde ilk olarak, artan gerilmeye karşılık malzemenin belirli bir oranda şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu bölge birinci bölgedir ve gerçekleşen şekil değişimi elastiktir, yani tersine çevrilebilir ya da başka bir ifade ile uygulanan gerilmenin geri çekilmesi

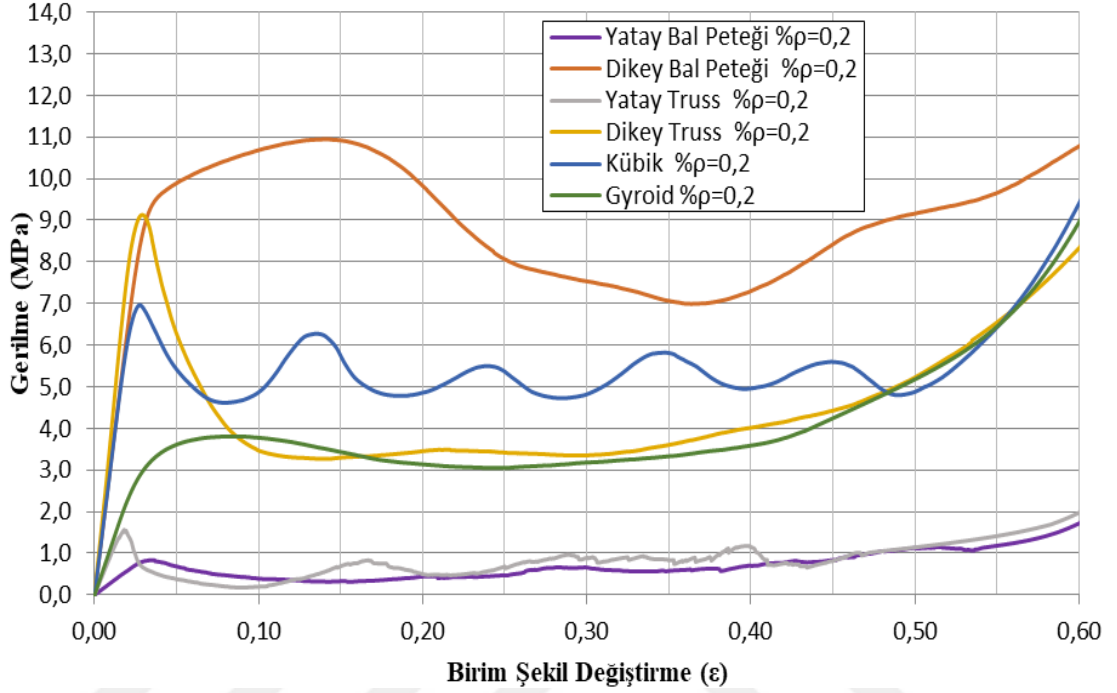
durumunda hücresel yapı eski halini alabilmektedir. Bu bölgede, uygulanan gerilmeye karşılık, oluşan birim şekil değişimi lineer olarak değişmektedir ve elastisite modülü sabittir. Hücresel yapı içerisinde yer alan bazı hücreler birinci bölgenin sonunda çökerler. İkinci bölgede gerilim değeri uzunca bir süre yaklaşık olarak sabit kalırken şekil değişimi devam eder. Bu bölgede sabit olan gerilim değeri plato gerilmesi (σ_{pl}) olarak adlandırılır. Tüm hücreler tamamen çökünceye kadar plastik ve burkulma çökmesi sürekli olarak gerçekleşir. İkinci bölge sonunda gerçekleşen şekil değişiminin geri dönüşümü yoktur, yani plastik şekil değişimi gerçekleşmiştir. Bu bölgede gerçekleşen plastik sıkışma esnasında, gerilme şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan yapının enerji depolama kabiliyetini gösterir. Bu durum hücresel malzemelerin sahip oldukları yüksek enerji emilimi özelliğini açıklamaktadır. Üçüncü bölge ise tekrar katı malzeme davranışının sergilendiği bölge olarak basitleştirilmiştir. Üçüncü bölgede hücre duvarları birbiri üzerinde ezilir ve bu durumda gerilme yaklaşık olarak dik bir şekilde hızlıca artmaktadır.

4.2.1.1 PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

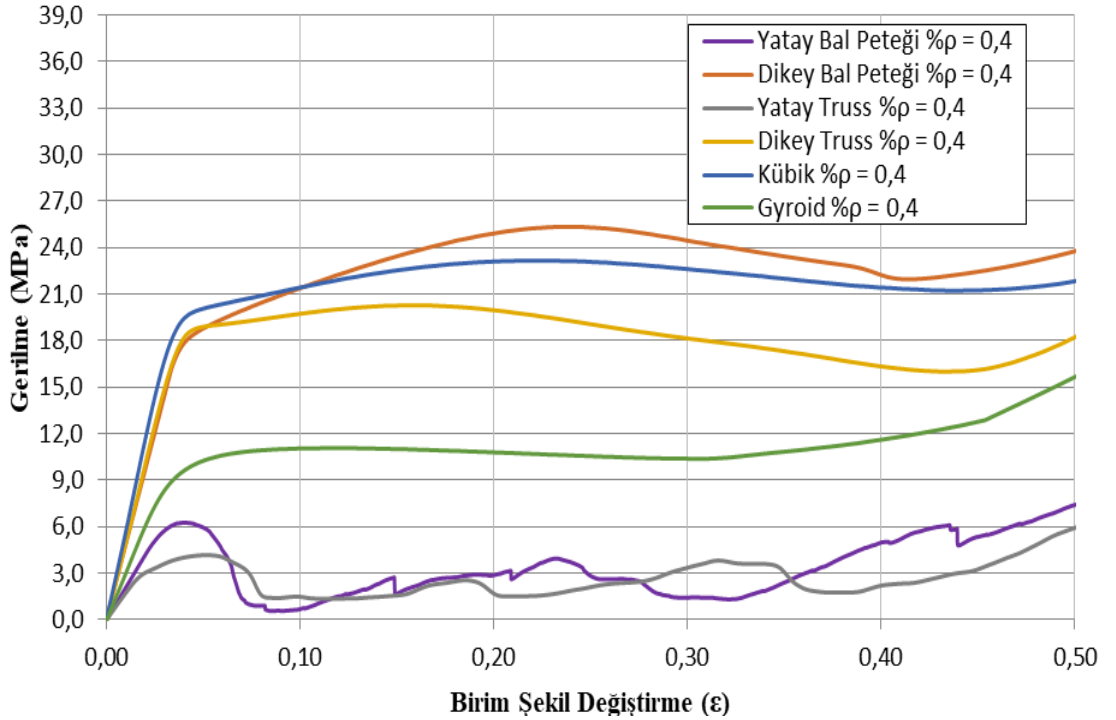
PLA malzemesinden üretilen basma numunelerine ait gerilme – şekil değiştirme eğrileri, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Aynı birim hücre boyutlarına ve ağırlıklara sahip basma numuneleri için deformasyon tipleri farklılıklar göstermektedir. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’daki gerilme - birim şekil değiştirme eğrilerine bakıldığında, en yüksek basma dayanımı değerleri çekme baskın deformasyon davranışına sahip dikey bal peteği, dikey truss ve kübik birim hücrelerine sahip numunelerde gözlemlenmektedir. Eğme baskın davranış gösteren yatay bal peteği ve yatay truss birim hücreleri ise daha düşük basma dayanımı değerlerine sahiptir.

PLA malzemesinden üretilmiş farklı birim hücrelere ait basma numuneleri için Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’daki gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri üzerindeki değerler kullanılarak, Çizelge 4.1’de farklı birim hücrelere ait numunelerin izafi yoğunluğa bağlı elastisite modülleri (E) karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2’de ise farklı birim hücrelere ait numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmeler ($\sigma_{E\ max}$) karşılaştırılmıştır. Elastisite modülleri birinci bölgede lineer olarak değişen gerilme ve birim şekil değişimi

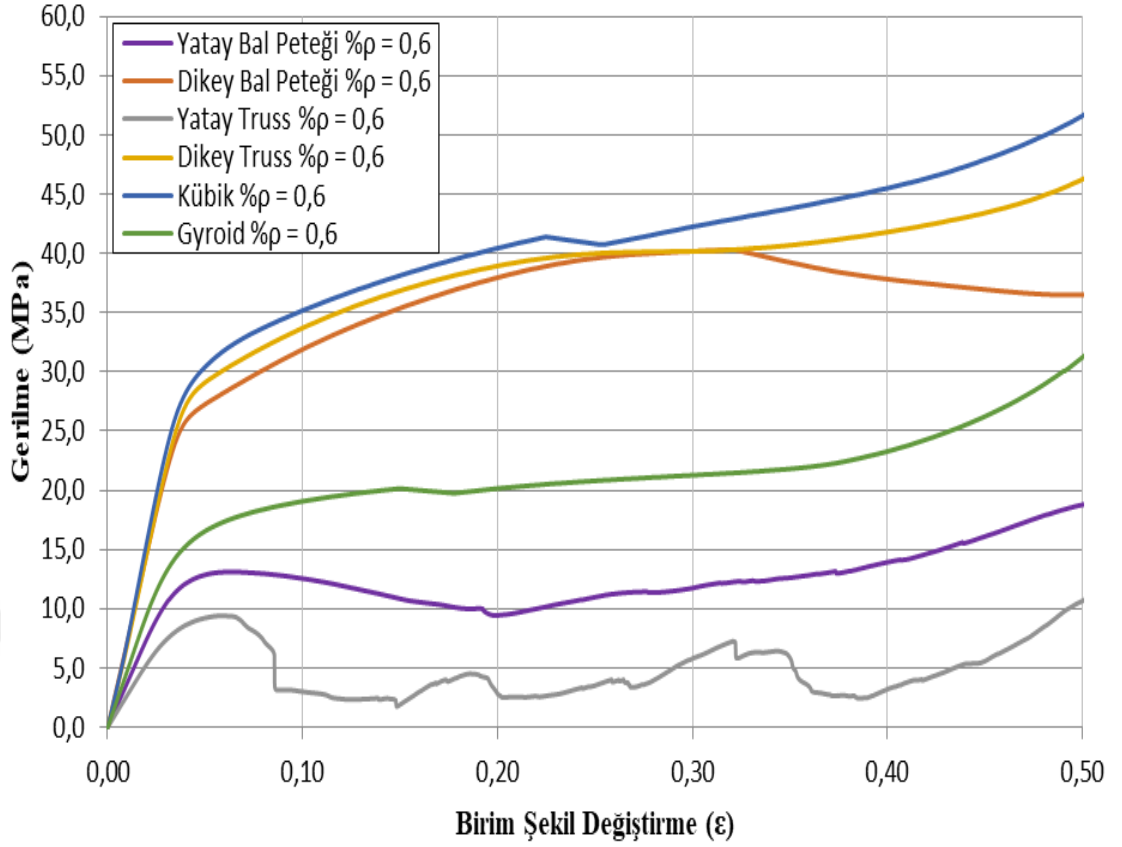
değerleri kullanılarak, denklem 3.8’de gösterilen formülasyon ($E=\sigma/e$) ile hesaplanmıştır. Farklı birim hürelere sahip basma numuneleri için elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme($\sigma_{E\max}$) değerleri ise elastik bölgenin sonunda ulaşılan maksimum gerilme değerleridir.



Şekil 4.4 : PLA malzemesinden üretilen %20 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hürelere için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi



Şekil 4.5 : PLA malzemesinden üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hürelere için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi



Şekil 4.6 : PLA malzemesinden üretilen %60 izafi yoğunluğa sahip farklı birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

Çizelge 4.1’de PLA malzemesinden, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücreleri kullanılarak üretilen %20, %40 ve %60 izafi yoğunluğa sahip basma numuneleri için elastisite modülleri verilmiştir. %20 izafi yoğunluk değeri için en yüksek elastisite modülü dikey truss birim hücrelerine sahip numune için 395 MPa olarak okunurken, en düşük elastisite modülü değeri yatay bal peteği birim hücrelerine sahip numune için 35 MPa olarak okunmuştur. %40 izafi yoğunluk değeri için en yüksek elastisite modülü kübik birim hücrelerine sahip basma numunesi için 580 MPa iken en düşük elastisite modülü yatay truss birim hücrelerine sahip basma numunesi için 165 MPa’dır. %60 izafi yoğunluk değeri için ise en yüksek elastisite modülü kübik birim hücrelerine sahip basma numunesi için 760 MPa iken en düşük elastisite modülü yatay truss birim hücrelerine sahip basma numunesi için 265 MPa’dır. Genel olarak bir değerlendirme yapılacak olursa dikey bal peteği, dikey truss ve kübik birim hücrelerinin kullanılmasıyla üretilen basma numuneleri, çekme baskın deformasyon şekil değişimi göstermelerinden dolayı daha rijittir yani daha büyük elastisite modüllerine sahiptir. Yatay bal peteği, yatay truss ve gyroid birim hücrelerine

sahip numuneler ise daha küçük elastisite modülü değerine sahiptir. İzafi yoğunluğun ya da başka bir ifadeyle ağırlığın artması elastisite modülünü arttırmaktadır.

Çizelge 4.1 : PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin izafi yoğunluğa ve birim hücre şekline bağlı elastisite modüllerinin (E) karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	%20 izafi yoğunluk	%40 izafi yoğunluk	%60 izafi yoğunluk
Yatay bal peteği	35 MPa	205 MPa	375 MPa
Dikey bal peteği	315 MPa	490 MPa	715 MPa
Yatay truss	93 MPa	165 MPa	265 MPa
Dikey truss	395 MPa	500 MPa	720 MPa
Kübik	310 MPa	580 MPa	760 MPa
Gyroid	115 MPa	300 MPa	475 MPa

Çizelge 4.2, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücreleri kullanılarak, PLA malzemesinden üretilen %20, %40 ve %60 izafi yoğunluğa sahip basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmeleri göstermektedir. %20 izafi yoğunluk değeri için en yüksek dayanım değeri dikey bal peteği birim hücresine sahip numune için 8,4 MPa olarak okunurken, en düşük dayanım değeri yatay bal peteği birim hücresine sahip numune için 0,75 MPa olarak okunmuştur. %40 izafi yoğunluk değeri için en yüksek dayanım kübik birim hücresine sahip basma numunesi için 16,9 MPa iken en düşük dayanım yatay truss birim hücresine sahip basma numunesi için 2,6 MPa'dır. %60 izafi yoğunluk değeri için ise en yüksek dayanım kübik birim hücresine sahip basma numunesi için 24,6 MPa iken en düşük dayanım yatay truss birim hücresine sahip basma numunesi için 5,9 MPa'dır. Birim hücre şekline bağlı olarak PLA malzemesinden üretilmiş basma numuneleri için genel olarak elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan yapıların dayanabileceği maksimum gerilme değerlerinin, çekme baskın deformasyon sergileyen dikey bal peteği, dikey truss ve kübik birim hücresine sahip numunelerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca izafi yoğunluğun artması her birim hücre için kalıcı şekil değişimine uğramadan yapının dayanabileceği maksimum gerilme değerlerini belirli oranda arttırmıştır.

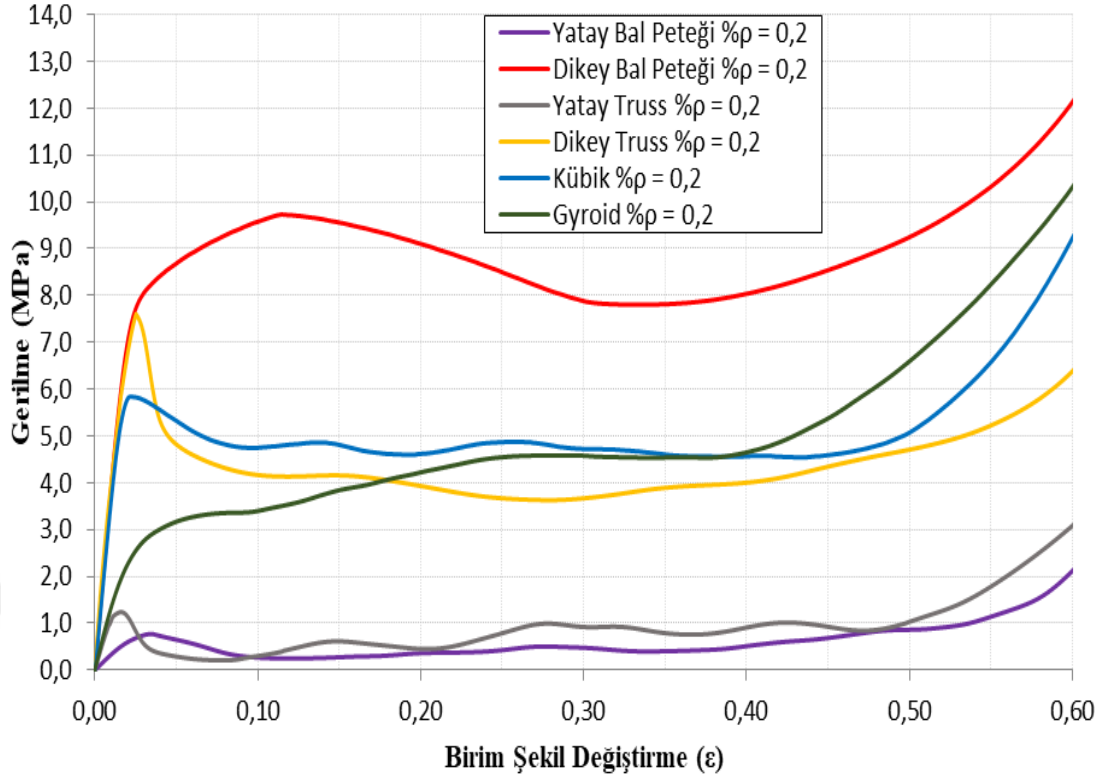
Çizelge 4.2 : PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmelerinin ($\sigma_{E\ max}$) karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	%20 izafi yoğunluk	% 40 izafi yoğunluk	% 60 izafi yoğunluk
Yatay bal peteği	0,75 MPa	5,1 MPa	8,8 MPa
Dikey bal peteği	8,4 MPa	15,4 MPa	21,5 MPa
Yatay truss	1,4 MPa	2,6 MPa	5,9 MPa
Dikey truss	7,9 MPa	15,8 MPa	22,9 MPa
Kübik	5,9 MPa	16,9 MPa	24,6 MPa
Gyroid	2,7 MPa	7,5 MPa	10,1 MPa

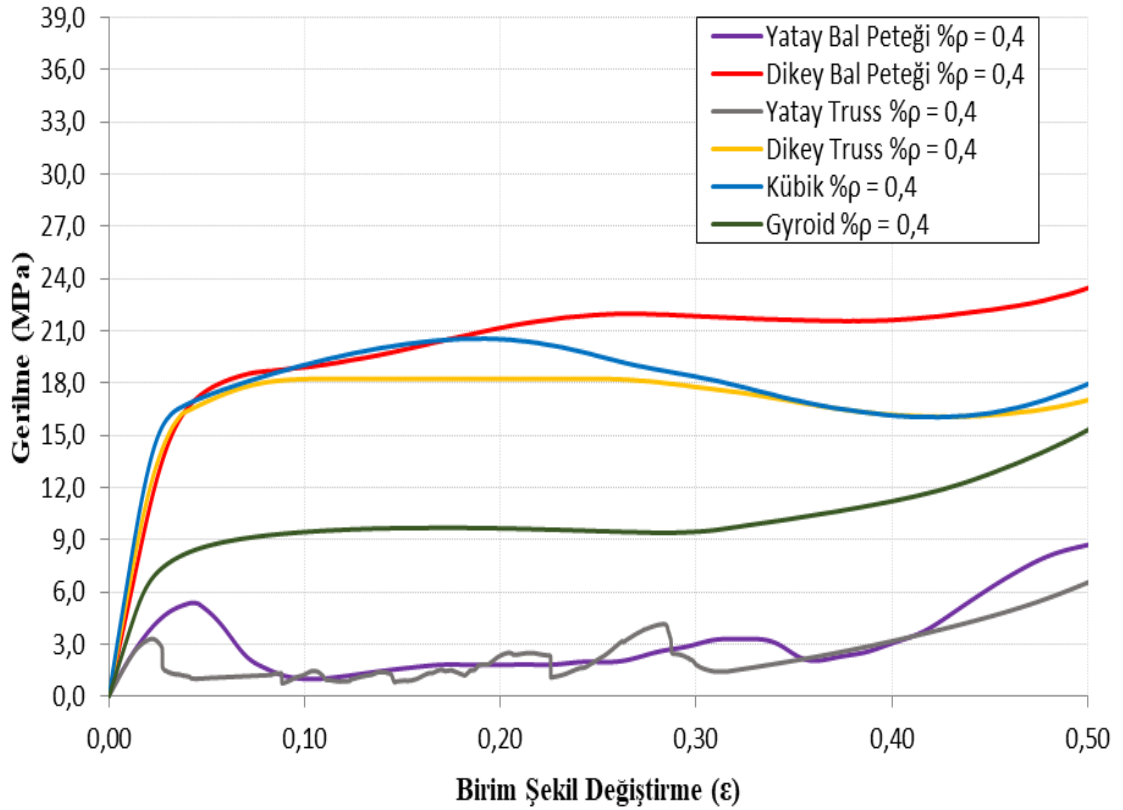
4.2.1.2 CFR-PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

CFR-PLA malzemesinden altı farklı birim hücrenin kullanılmasıyla oluşturulmuş basma numunelerine ait gerilme – şekil değiştirme eğrileri, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Periyodik hücreli çekirdeğe sahip basma numunelerinin gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, bir önceki bölümde açıklanan üç bölge burada da açıkça görülmektedir. Birinci bölgede artan gerilme değerine karşılık yapı belirli bir oranda şekil değiştirmektedir. Birinci bölgede gerçekleşen şekil değişimi elastiktir ve bu bölgede elastisite modülü sabittir. İkinci bölgede gerilim değeri uzunca bir süre yaklaşık olarak sabit kalırken şekil değişimi devam etmektedir. Bu bölgede sabit olan gerilim değeri plato gerilmesi (σ_{pl}) olarak adlandırılır. İkinci bölge sonunda gerçekleşen şekil değişiminin geri dönüşümü yoktur, yani plastik şekil değişimi gerçekleşmiştir. Üçüncü bölge ise tekrar katı malzeme davranışının sergilendiği bölge olarak basitleştirilmiştir ve bu bölgede gerilme yaklaşık olarak dik bir şekilde hızlıca artmaktadır.

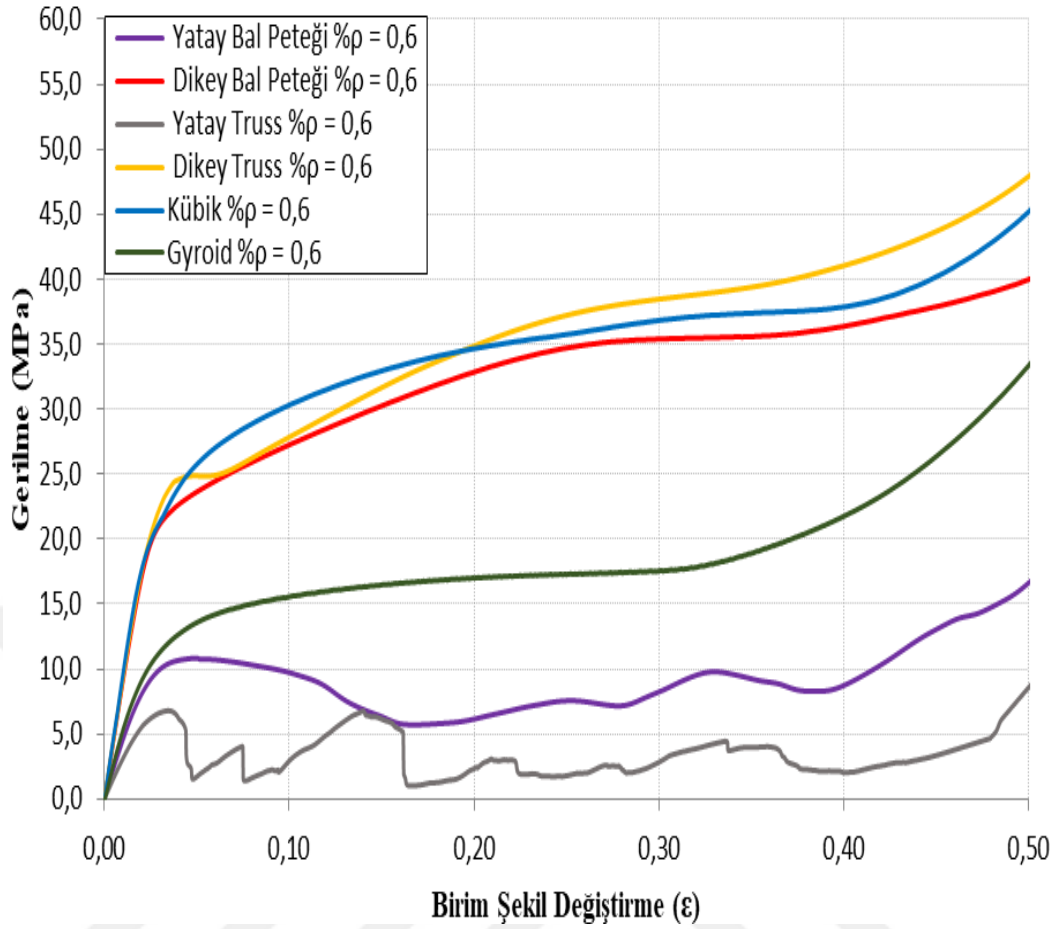
CFR-PLA malzemesi kullanılarak %20, %40 ve %60 izafi yoğunluklarında, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücrelerinden üretilen numunelere ait elastisite modülleri Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %20 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi



Şekil 4.8 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi



Şekil 4.9 : CFR-PLA malzemesinden üretilen %60 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

Çizelge 4.3 incelendiğinde %20 izafi yoğunluk değeri için en yüksek elastisite modülü dikey truss birim hücresine sahip numune için 440 MPa olarak okunurken, en düşük elastisite modülü değeri yatay bal peteği birim hücresine sahip numune için 40 MPa olarak okunmuştur. %40 izafi yoğunluk değeri için en yüksek elastisite modülü kübik birim hücresine sahip basma numunesi için 720 MPa iken en düşük elastisite modülü yatay bal peteği birim hücresine sahip basma numunesi için 190 MPa'dır. %60 izafi yoğunluk değeri için ise en yüksek elastisite modülü dikey truss birim hücresine sahip basma numunesi için 910 MPa iken en düşük elastisite modülü yatay truss birim hücresine sahip basma numunesi için 310 MPa'dır. Elde edilen bu sonuçlara göre aynı izafi yoğunluğa sahip farklı birim hücrelerin elastisite modülleri arasında ciddi bir fark olduğu görülmektedir. Yatay dizilimine sahip bal peteği ve truss birim hücrelerinin elastisite modülleri diğer hücre tiplerine kıyasla daha düşük iken dikey dizilime sahip bal peteği ve truss birim hücreleri için elastisite modülleri diğer hücre tiplerinden daha yüksektir.

Çizelge 4.3 : CFR-PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin izafi yoğunluğa ve birim hücre şekline bağlı elastisite modüllerinin (E) karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	%20 izafi yoğunluk	%40 izafi yoğunluk	%60 izafi yoğunluk
Yatay bal peteği	40 MPa	190 MPa	460 MPa
Dikey bal peteği	380 MPa	520 MPa	880 MPa
Yatay truss	120 MPa	200 MPa	310 MPa
Dikey truss	440 MPa	600 MPa	910 MPa
Kübik	360 MPa	720 MPa	840 MPa
Gyroid	140 MPa	360 MPa	540 MPa

Çizelge 4.4, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücreleri kullanılarak, CFR-PLA malzemesinden üretilen %20, %40 ve %60 izafi yoğunluğa sahip basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmeleri göstermektedir. %20 izafi yoğunluk değeri için en yüksek dayanım değeri dikey bal peteği birim hücrelerine sahip numune için 5,8 MPa olarak okunurken, en düşük dayanım değeri yatay bal peteği birim hücrelerine sahip numune için 0,6 MPa olarak okunmuştur. %40 izafi yoğunluk değeri için en yüksek dayanım kübik birim hücrelerine sahip basma numunesi için 11,2 MPa iken en düşük dayanım yatay truss birim hücrelerine sahip basma numunesi için 2,3 MPa'dır. %60 izafi yoğunluk değeri için ise en yüksek dayanım kübik birim hücrelerine sahip basma numunesi için 17,6 MPa iken en düşük dayanım yatay truss birim hücrelerine sahip basma numunesi için 4,9 MPa'dır. Birim hücre şekline bağlı olarak CFR-PLA malzemesinden üretilmiş basma numuneleri için genel olarak elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan yapıların dayanabileceği maksimum gerilme değerlerinin, çekme baskın deformasyon sergileyen dikey bal peteği, dikey truss ve kübik birim hücrelerine sahip numunelerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yatay bal peteği, yatay truss, gyroid birim hücrelerine sahip basma numunelerinin ise elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme değerleri daha düşüktür.

Çizelge 4.4 : CFR-PLA malzemesinden üretilen basma numunelerinin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilmelerinin ($\sigma_{E \max}$) karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	%20 izafi yoğunluk	%40 izafi yoğunluk	%60 izafi yoğunluk
Yatay bal peteği	0,6 MPa	4,3 MPa	6,7 MPa
Dikey bal peteği	5,8 MPa	11,1 MPa	16,4 MPa
Yatay truss	1 MPa	2,3 MPa	4,9 MPa
Dikey truss	5,4 MPa	9,2 MPa	17,2 MPa
Kübik	4,6 MPa	11,2 MPa	17,6 MPa
Gyroid	1,8 MPa	5,3 MPa	8,1 MPa

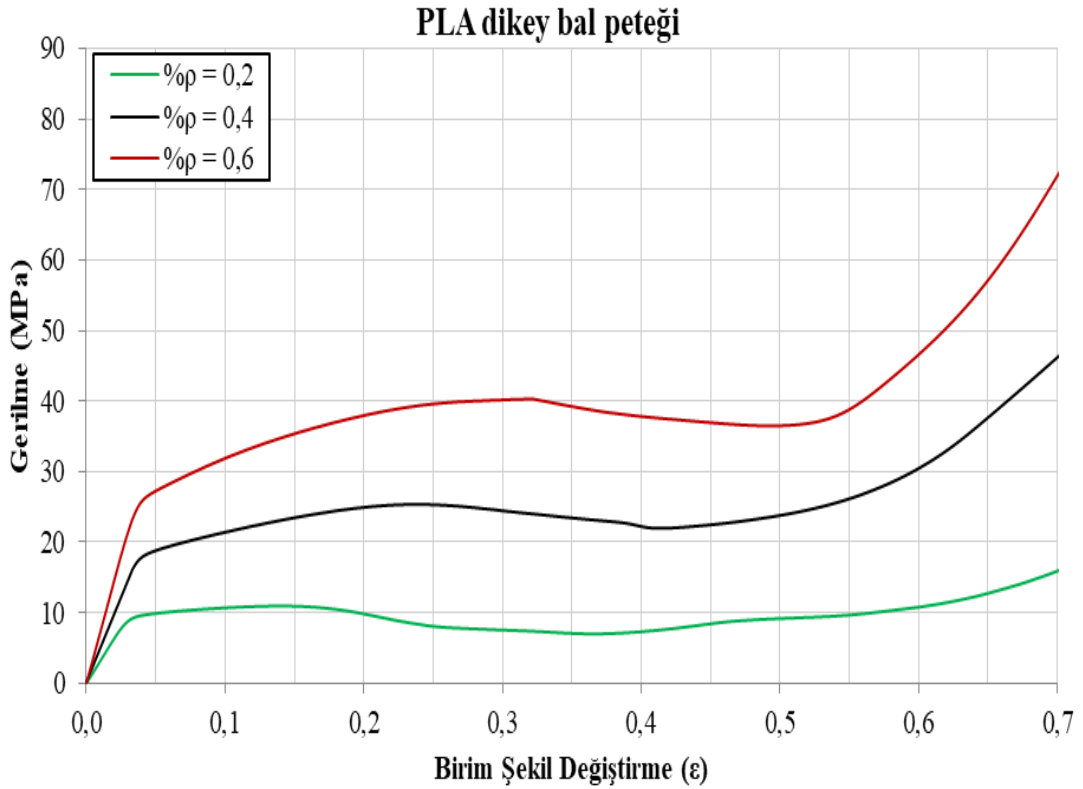
4.2.2 Basma özelliklerinin, izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Bu bölümde, PLA ve CFR-PLA malzemesinden üretilen altı farklı birim hücreye sahip basma numunelerinin izafi yoğunluğa bağlı olarak basma özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

4.2.2.1 PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Bu bölümde yer alan şekillerde, PLA malzemesinden üretilen farklı birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri üzerinde gösterilmektedir. Şekil 4.10’da PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.10’da görüldüğü üzere izafi yoğunluğun %20’den %60’a artması sonucu yapının elastisite modülü ve elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme ($\sigma_{E \max}$) değeri artmıştır. Dikey bal peteği birim hücreleri kullanılarak üretilmiş numunelerin gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için $E=315$ MPa, %40 izafi yoğunluk için $E=490$ MPa ve %60 izafi yoğunluk için $E=715$ MPa okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme ($\sigma_{E \max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 8,4 MPa, %40 izafi yoğunluk için 15,4 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 21,5 MPa olarak okunmaktadır.

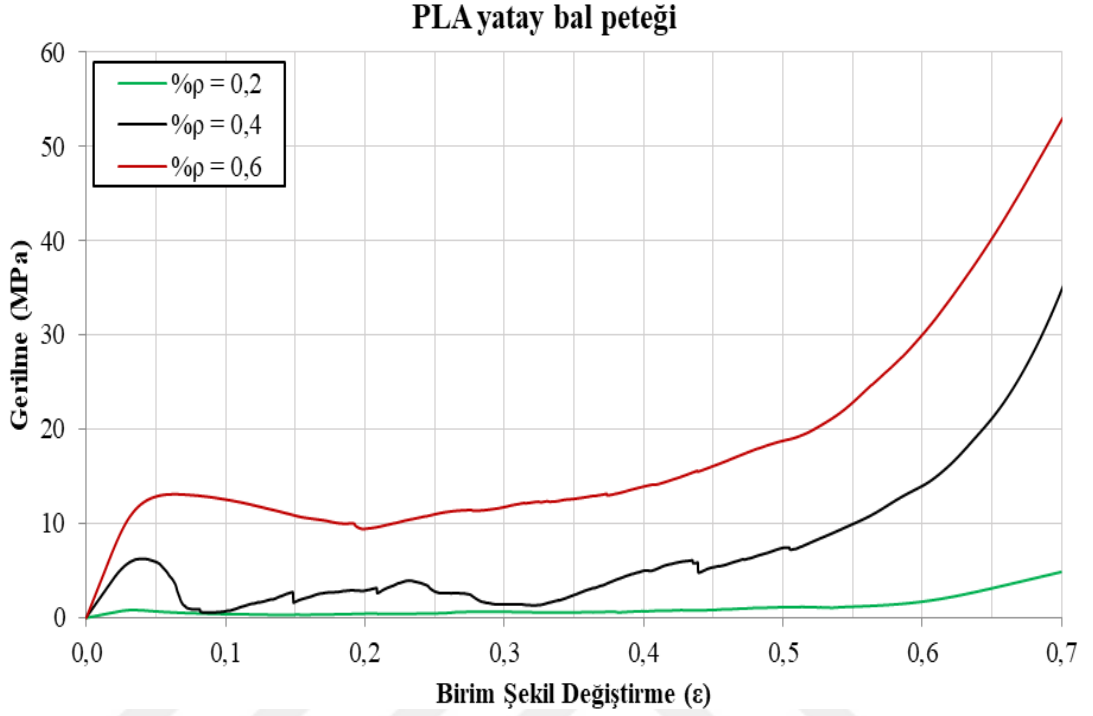
Şekil 4.11’de PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. İzafi yoğunluk değerinin %20’den %60’a artması neticesinde yapının elastisite modülü (E) ve elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme ($\sigma_{E\ max}$) değerlerinin arttığı görülmektedir. Yatay bal peteği birim hücresine sahip numuneler için oluşturulmuş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için E=35 MPa, %40 izafi yoğunluk için E=205 MPa ve %60 izafi yoğunluk için E=375 MPa olarak okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme($\sigma_{E\ max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 0,75 MPa, %40 izafi yoğunluk için 5,1 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 8,8 MPa olarak okunmaktadır.



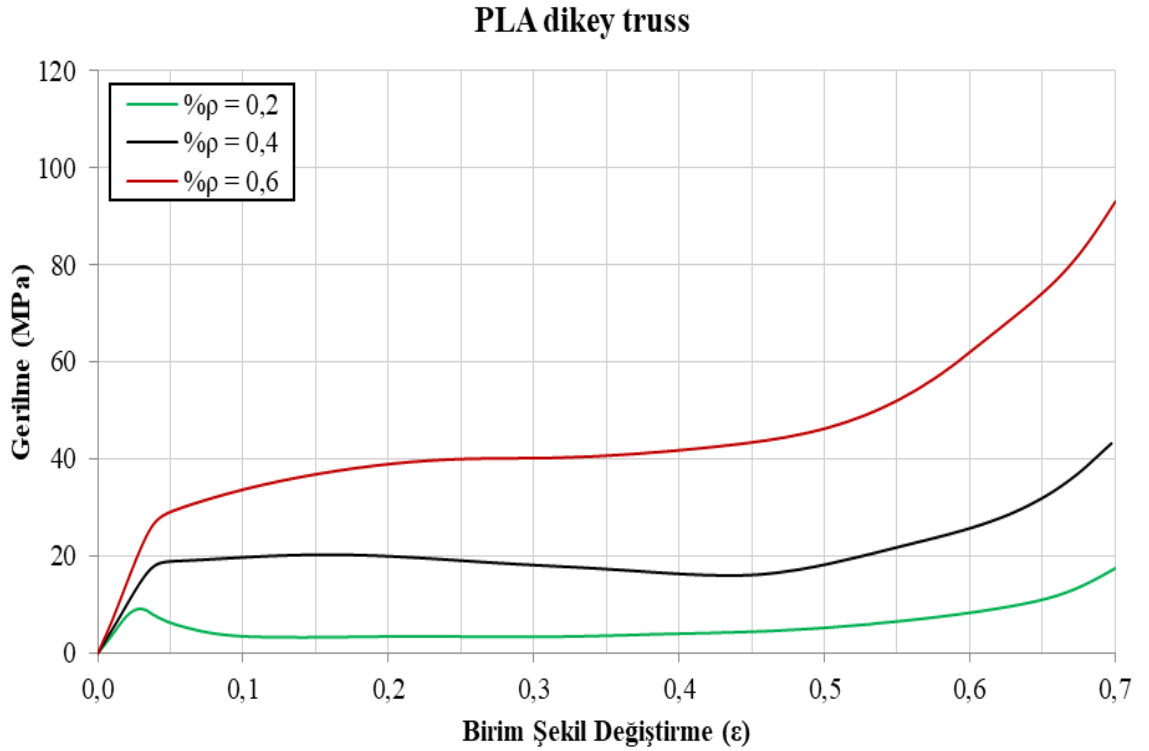
Şekil 4.10 : PLA malzemesinden üretilen dikey bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Şekil 4.12’de PLA malzemesinden üretilen dikey truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. Dikey truss birim hücresine sahip numuneler için oluşturulmuş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için E=395 MPa, %40 izafi yoğunluk için E=500 MPa ve %60 izafi yoğunluk için E=720 MPa olarak okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan

dayanabilecekleri maksimum gerilme($\sigma_{E\ max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 7,9 MPa, %40 izafi yoğunluk için 15,8 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 22,9 MPa olarak okunmaktadır.



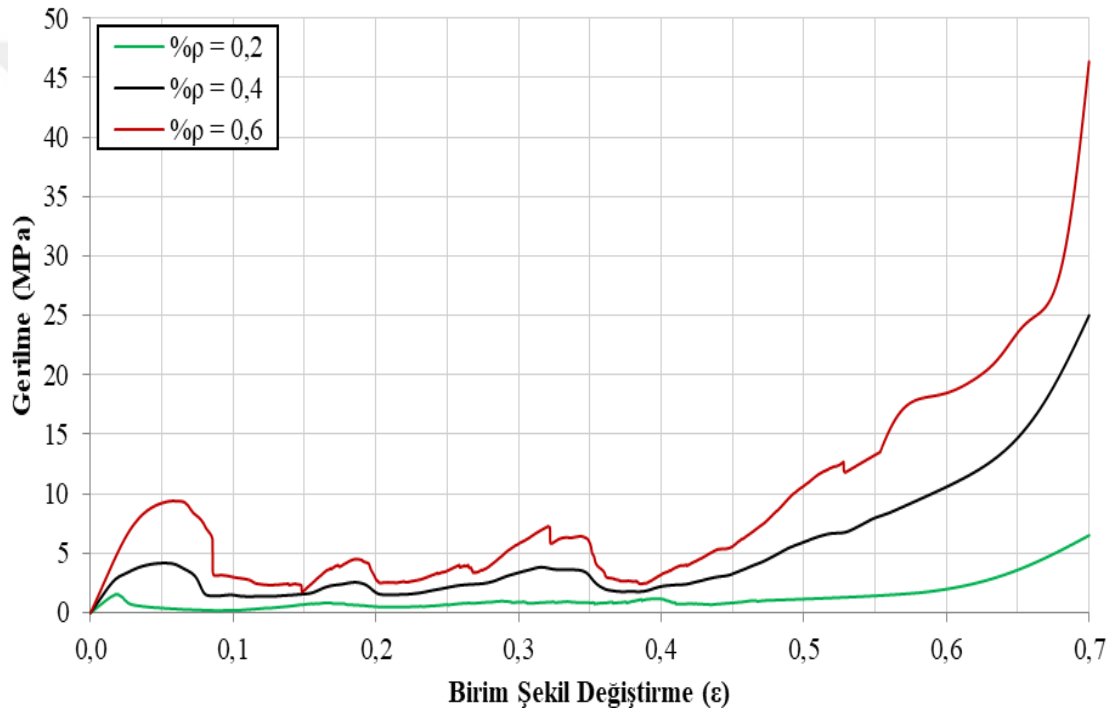
Şekil 4.11 : PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi



Şekil 4.12 : PLA malzemesinden üretilen dikey truss birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Şekil 4.13’de PLA malzemesinden üretilen yatay truss birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. Yatay truss birim hücrelerine sahip numuneler için oluşturulmuş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için $E=93$ MPa, %40 izafi yoğunluk için $E=165$ MPa ve %60 izafi yoğunluk için $E=265$ MPa olarak okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme($\sigma_{E\ max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 1,4 MPa, %40 izafi yoğunluk için 2,6 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 5,9 MPa olarak okunmaktadır.

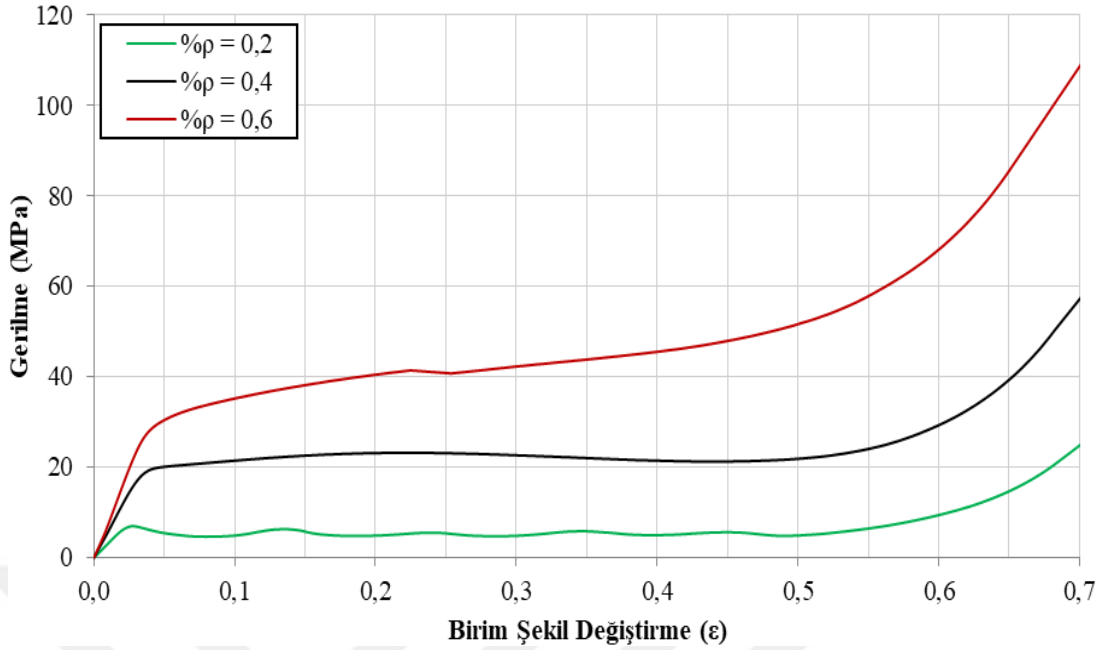
PLA yatay truss



Şekil 4.13 : PLA malzemesinden üretilen yatay truss birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Şekil 4.14’de PLA malzemesinden üretilen kübik birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. Kübik birim hücrelerine sahip numuneler için oluşturulmuş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için $E=310$ MPa, %40 izafi yoğunluk için $E=580$ MPa ve %60 izafi yoğunluk için $E=760$ MPa olarak okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme($\sigma_{E\ max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 5,9 MPa, %40 izafi yoğunluk için 16,9 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 24,6 MPa olarak okunmaktadır.

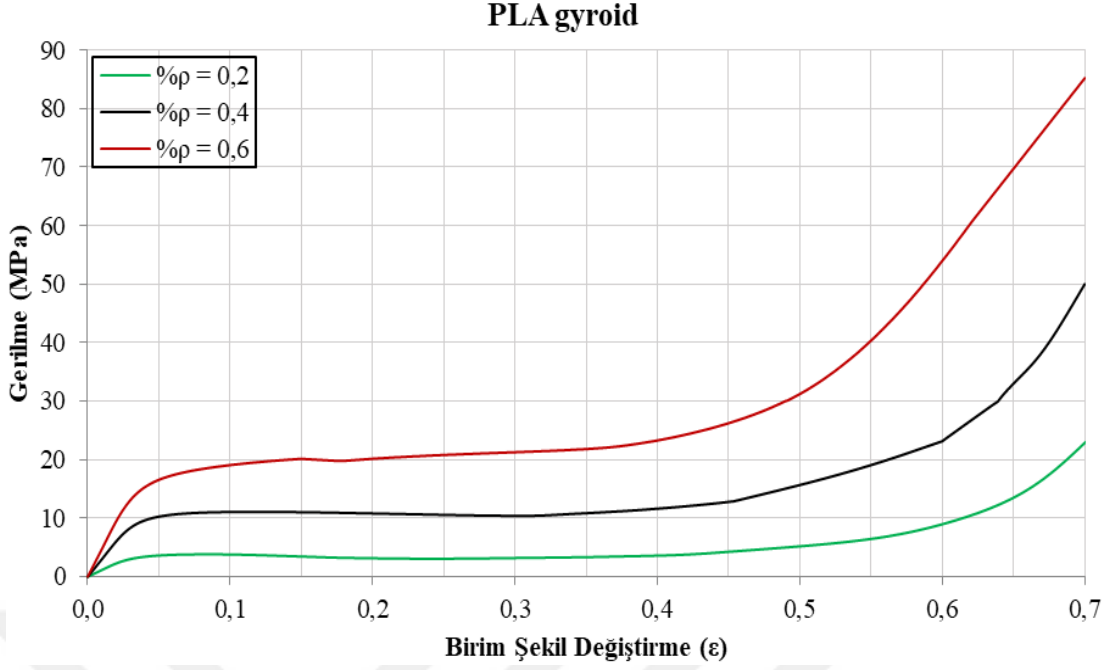
PLA kübik



Şekil 4.14 : PLA malzemesinden üretilen kübik birim hücreye sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Şekil 4.15’de PLA malzemesinden üretilen gyroid birim hücreye sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gösterilmektedir. Gyroid birim hücreye sahip numuneler için oluşturulmuş gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde; %20 izafi yoğunluk için $E=115$ MPa, %40 izafi yoğunluk için $E=300$ MPa ve %60 izafi yoğunluk için $E=475$ MPa olarak okunmaktadır. Numunelerin elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme ($\sigma_{E\ max}$) değerleri ise; %20 izafi yoğunluk için 2,7 MPa, %40 izafi yoğunluk için 7,5 MPa ve %60 izafi yoğunluk için 10,1 MPa olarak okunmaktadır.

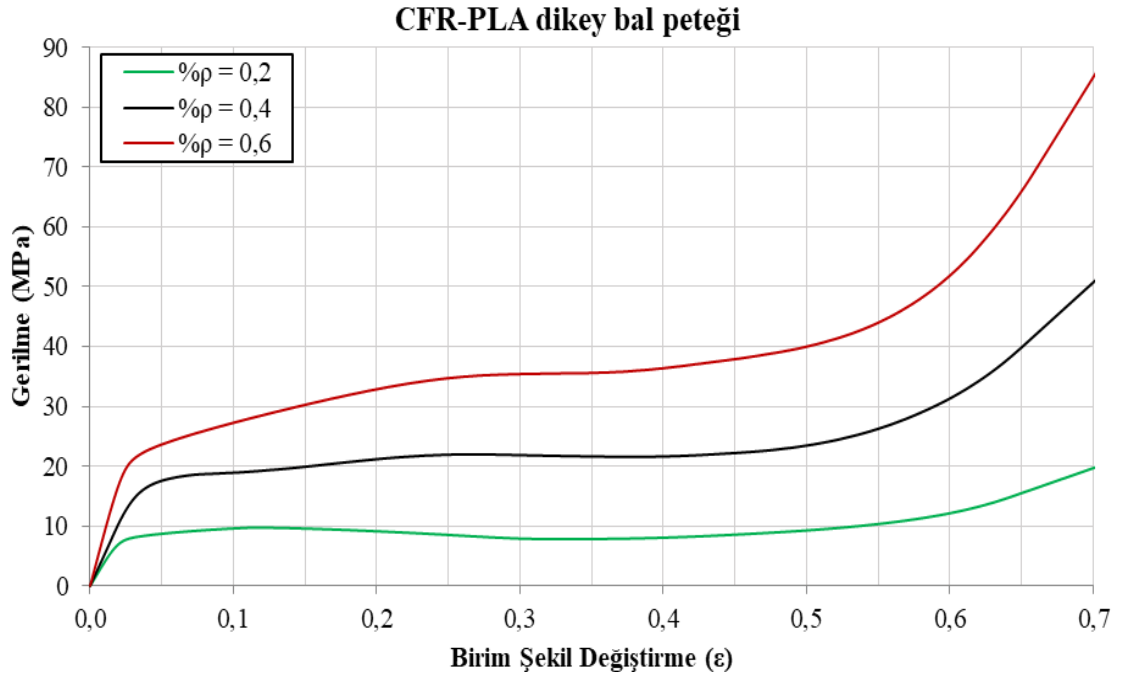
PLA malzemesi kullanılarak üretilen tüm numuneler için elastisite modülü ve elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan yapının dayanabileceği maksimum gerilme ($\sigma_{E\ max}$) değerleri birim hücre şekline ve izafi yoğunluğa göre farklı oranlarda değişmektedir. Tüm numuneler göz önüne alındığında en yüksek elastisite modülü ve elastik bölgedeki maksimum gerilme değerleri %60 izafi yoğunluğa sahip kübik birim hücresi için 760 MPa ve 24,6 MPa olarak bulunmuştur. En düşük elastisite modülü ve elastik bölgedeki maksimum gerilme değerleri ise %20 izafi yoğunluğa sahip yatay bal peteği birim hücresi için 35 MPa ve 0,75 MPa olarak bulunmuştur. Tüm birim hücre şekilleri için izafi yoğunluğun artması ile yapının dayanımını ve rijitliği artmıştır. Aynı birim hücre kullanılarak oluşturulmuş sandviç paneller için gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri birbirleriyle benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.15 : PLA malzemesinden üretilen gyroid birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

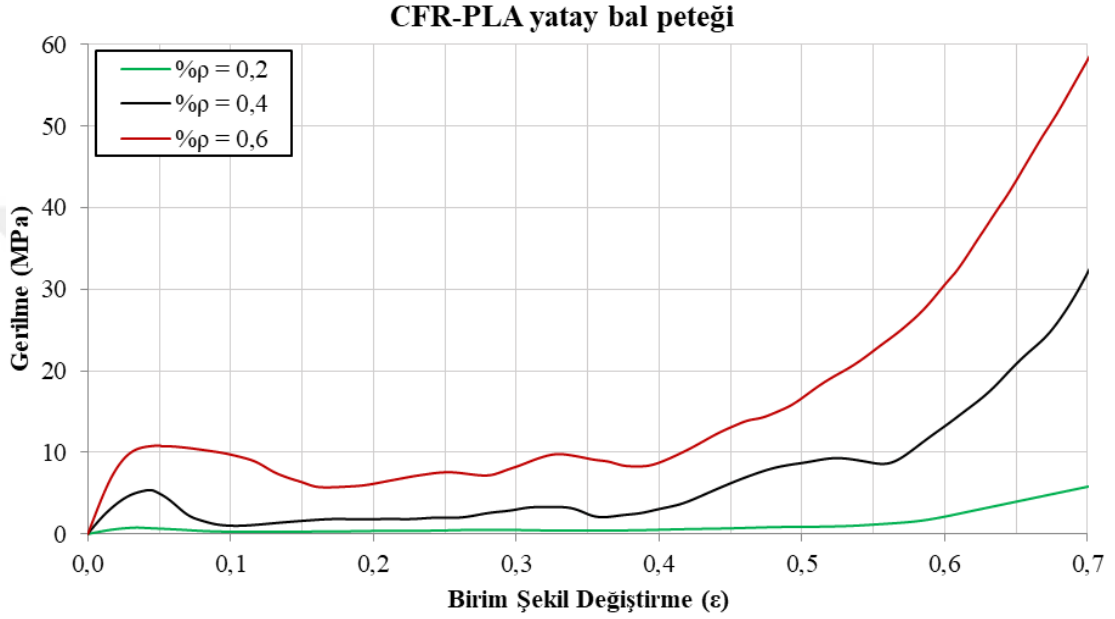
4.2.2.2 CFR-PLA malzemesinden üretilen numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Bu bölümde, CFR-PLA malzemesinden üretilen farklı birim hücrelere sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri üzerinde gösterilmektedir.

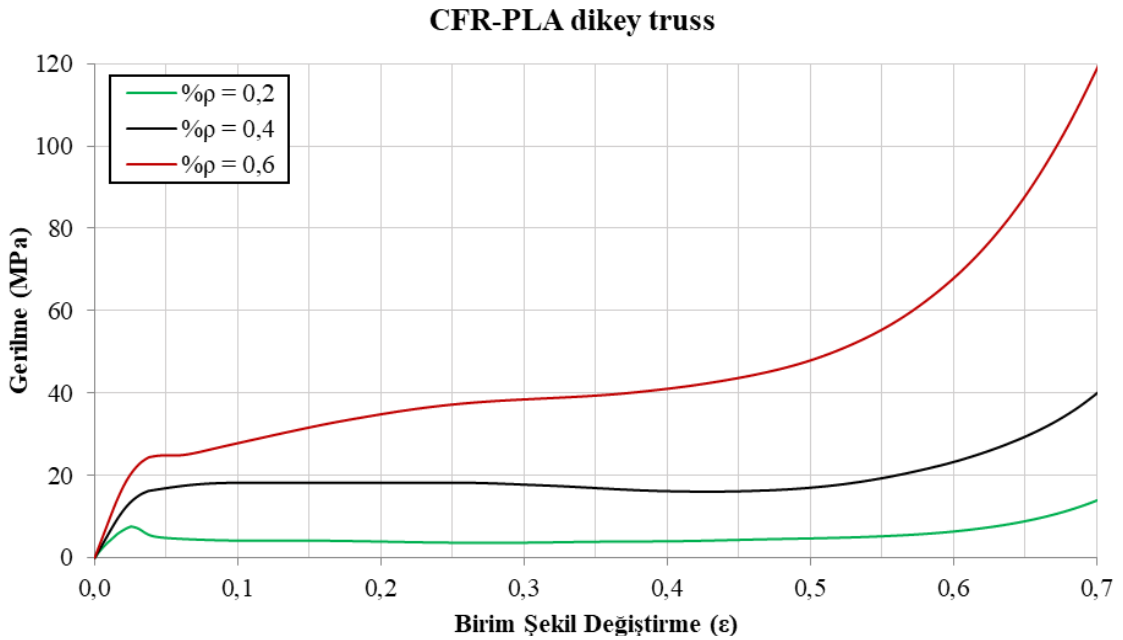


Şekil 4.16 : CFR-PLA malzemesinden üretilen dikey bal peteği birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

Dikey bal peteği, yatay bal peteği, dikey truss, yatay truss, gyroid ve kübik birim hücreleri kullanılarak oluşturulan numunelere uygulanan basma testi sonuçları, Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de gösterilmektedir. Altı farklı birim hücre ve uç farklı izafi yoğunlukta üretilen numunelerin gerilme – birim Şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen elastisite modülü ve yapının elastik bölgede kalıcı Şekil değişimine uğramadan dayanabilecekleri maksimum gerilme değerleri ise izelge 4.3 ve izelge 4.4’te verilmiştir.

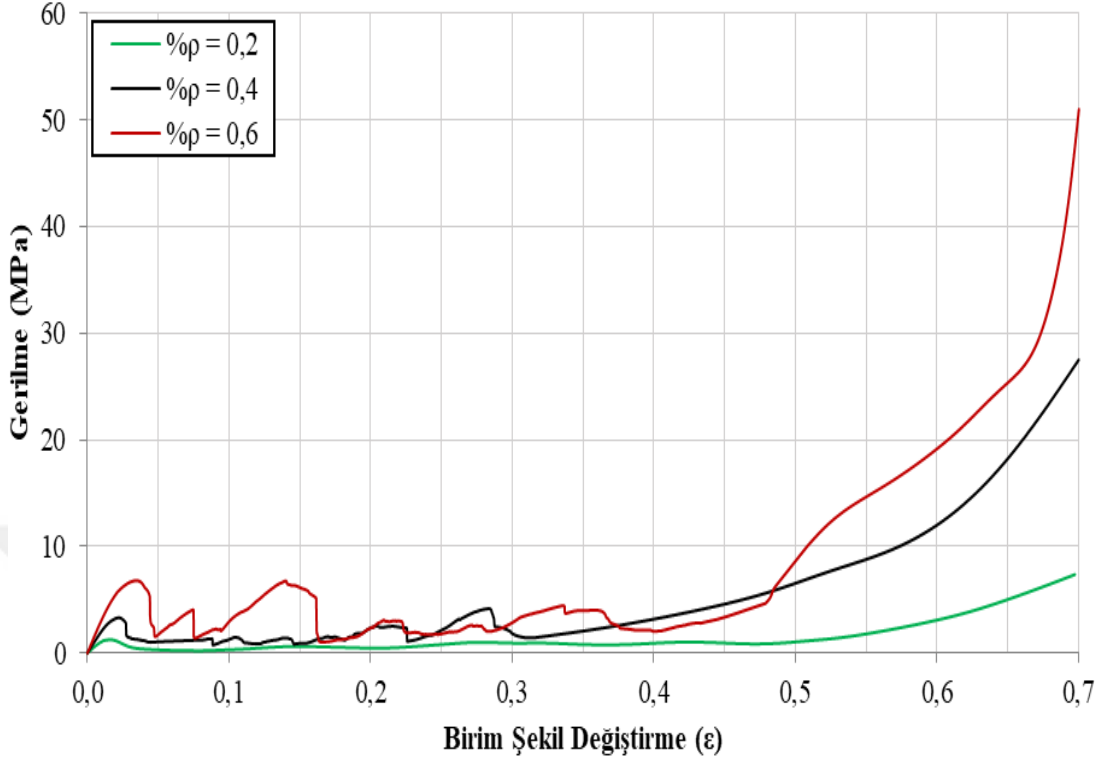


Şekil 4.17 : CFR-PLA malzemesinden üretilen yatay bal peteği birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi



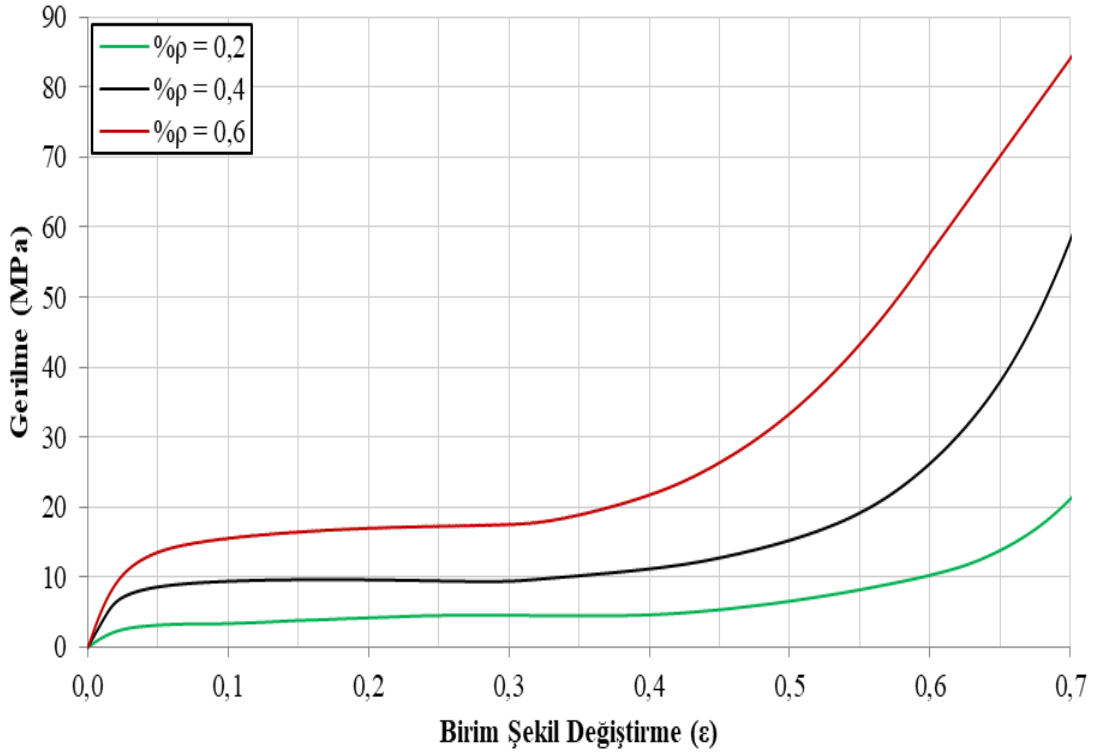
Şekil 4.18 : CFR-PLA malzemesinden üretilen dikey truss birim hücresine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

CFR-PLA yatay truss



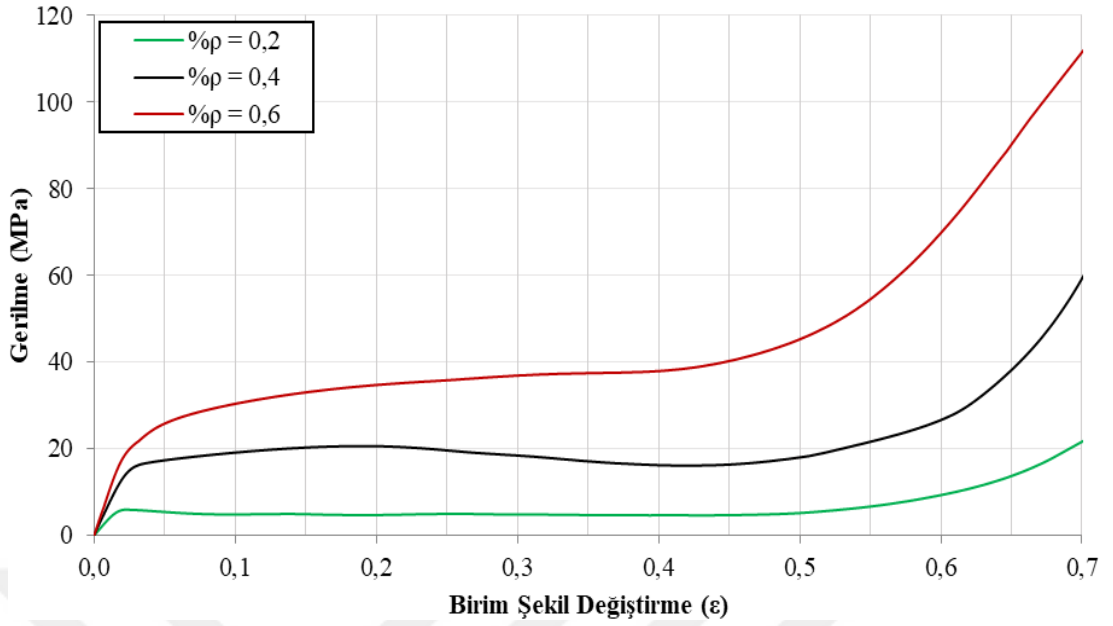
Şekil 4.19 : CFR-PLA malzemesinden üretilen yatay truss birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

CFR-PLA gyroid



Şekil 4.20 : CFR-PLA malzemesinden üretilen gyroid birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

CFR-PLA kübik



Şekil 4.21 : CFR-PLA malzemesinden üretilen kübik birim hücrelerine sahip numuneler için basma özelliklerinin izafi yoğunluğa bağlı değişimi

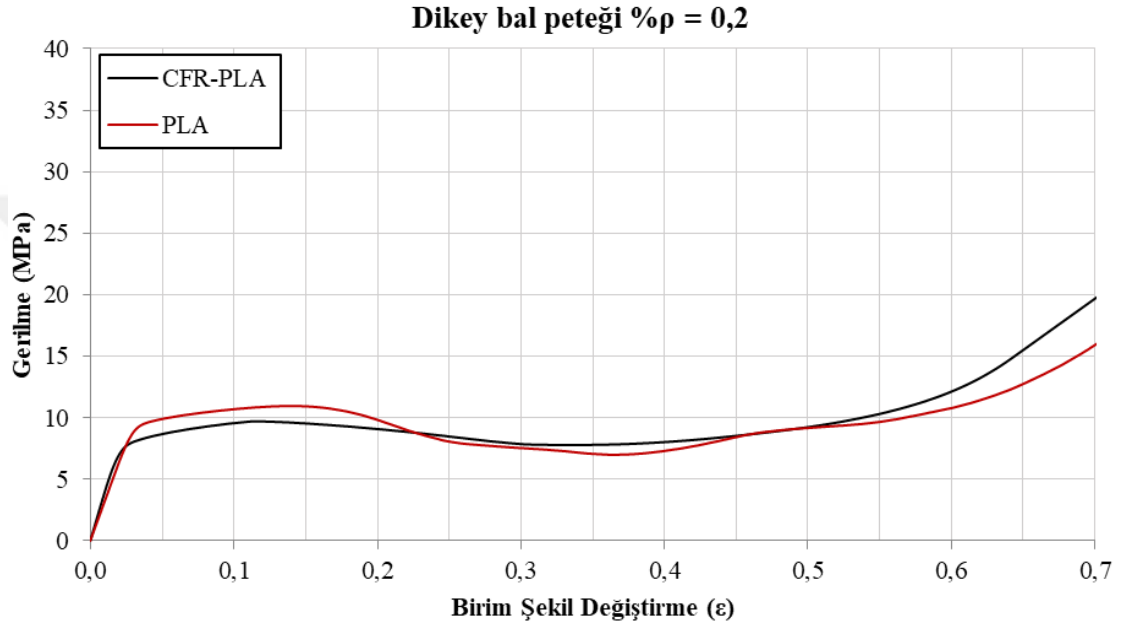
CFR-PLA malzemesinden üretilmiş farklı birim hücrelere sahip numuneler için izafi yoğunluğun mekanik özelliklere etkisi açıkça görülmektedir. İzafi yoğunluğun artması ile yapının dayanımı ve rijitliği artmıştır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilen değerler göz önüne alındığında, en yüksek elastisite modülü ve yapının elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme, %60 izafi yoğunluğundaki kübik birim hücrelerine sahip numunede gözlemlenmiştir. En küçük elastisite modülü ve elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanılabilecek maksimum gerilme ise %20 izafi yoğunluğa sahip yatay bal peteği birim hücrelerinde gözlemlenmiştir.

4.2.3 Basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

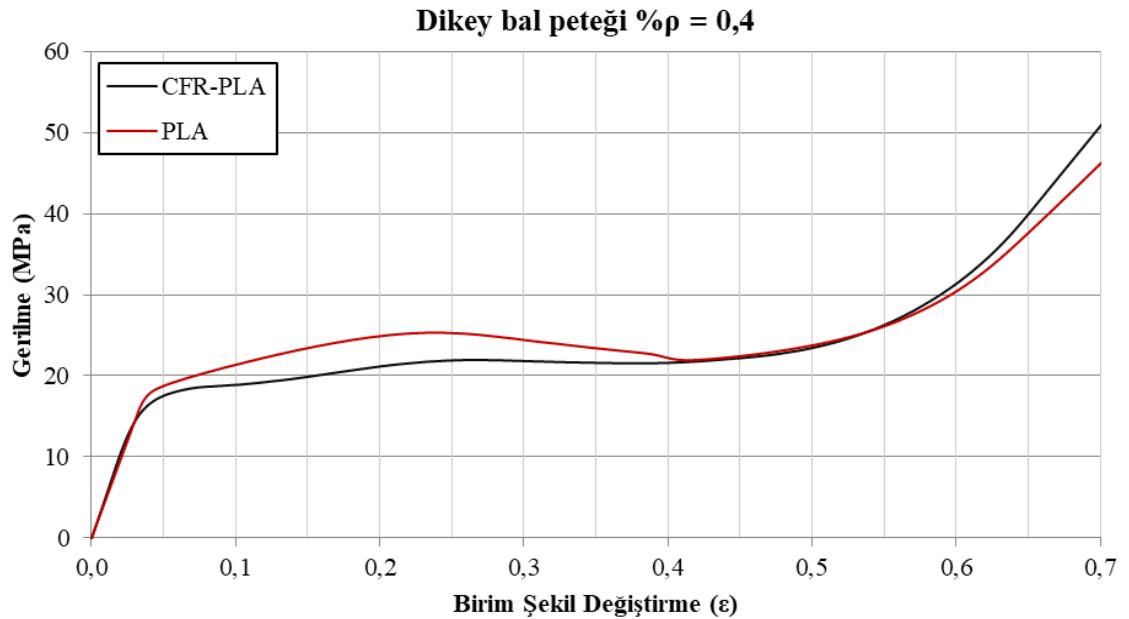
Bu bölümde, basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi gerilme – birim şekil değişirme eğrileri üzerinde ayrı ayrı gösterilmiştir. Altı farklı birim hücre ve üç farklı izafi yoğunluk değeri kullanılarak, PLA ve CFR-PLA malzemelerinden üretilen basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi gözlemlenmiştir. PLA ve CFR-PLA malzemeleri için aynı birim hücreye ve izafi yoğunluğa sahip numunelerde yapıların genel deformasyon şekilleri benzerlik göstermekle birlikte mekanik özelliklerde bazı değişiklikler vardır. PLA malzemesinden üretilen numunelerin elastik bölgedeki maksimum dayanımları daha yüksek iken, CFR-PLA malzemesinden üretilen numunelerin elastisite modülleri daha yüksektir.

4.2.3.1 Dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

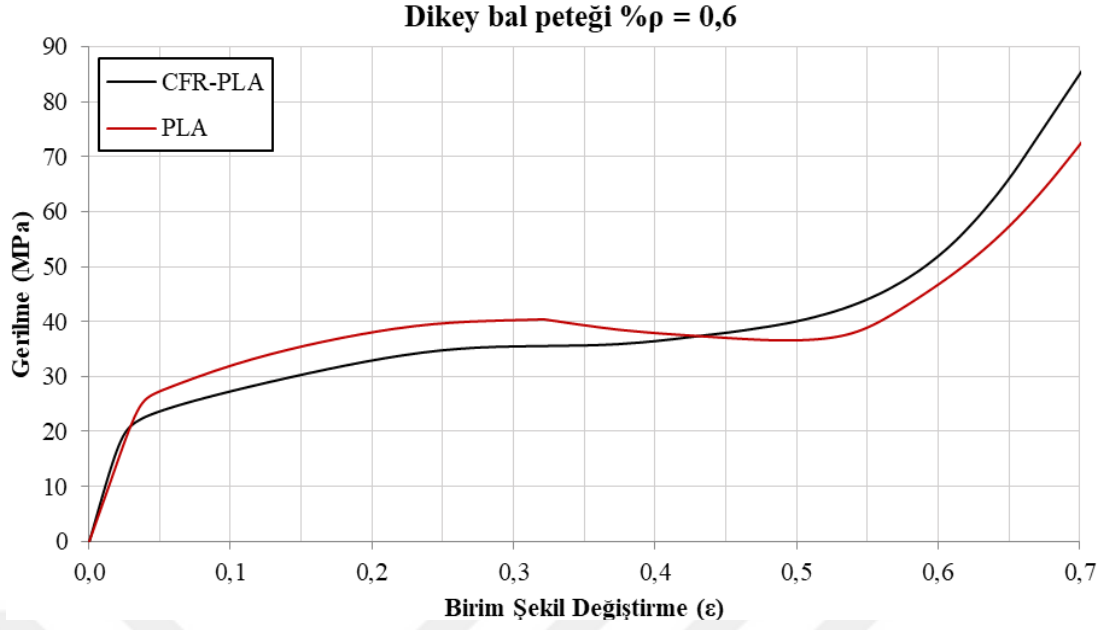
Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'de, dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.



Şekil 4.22 : %20 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



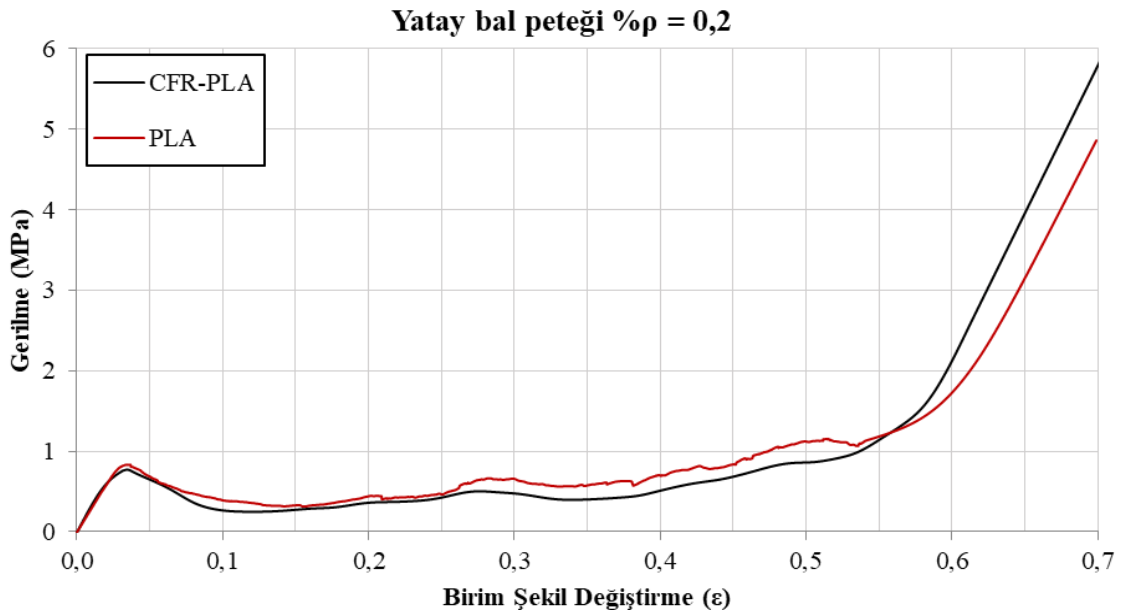
Şekil 4.23 : %40 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



Şekil 4.24 : %60 izafi yoğunluklu dikey bal peteği birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

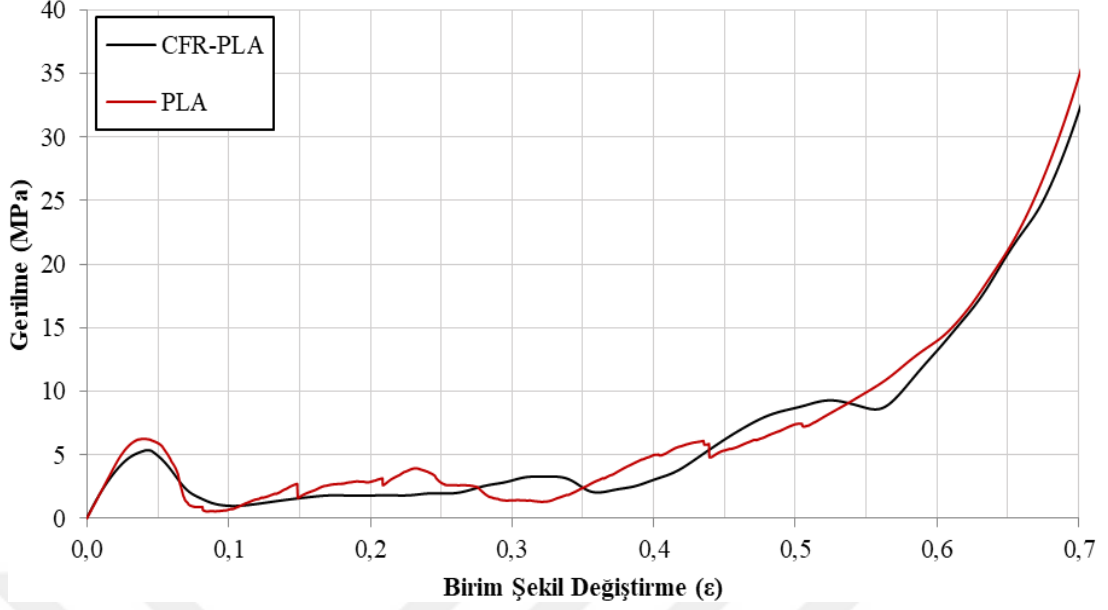
4.2.3.2 Yatay bal peteği birim hücreesine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de, yatay bal peteği birim hücreesine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.



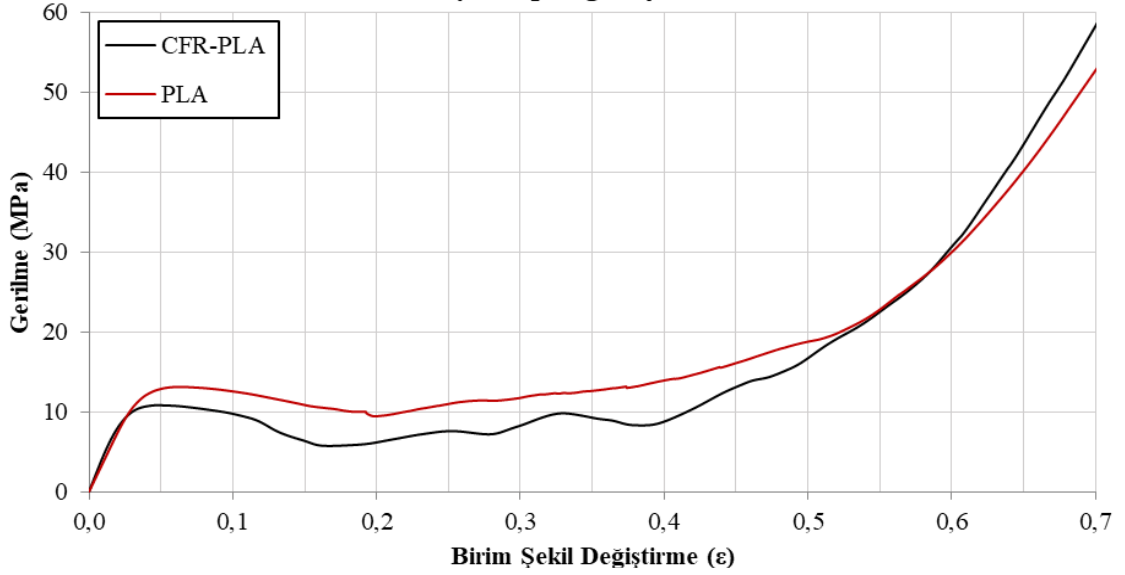
Şekil 4.25 : %20 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Yatay bal peteği % $\rho = 0,4$



Şekil 4.26 : %40 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Yatay bal peteği % $\rho = 0,6$

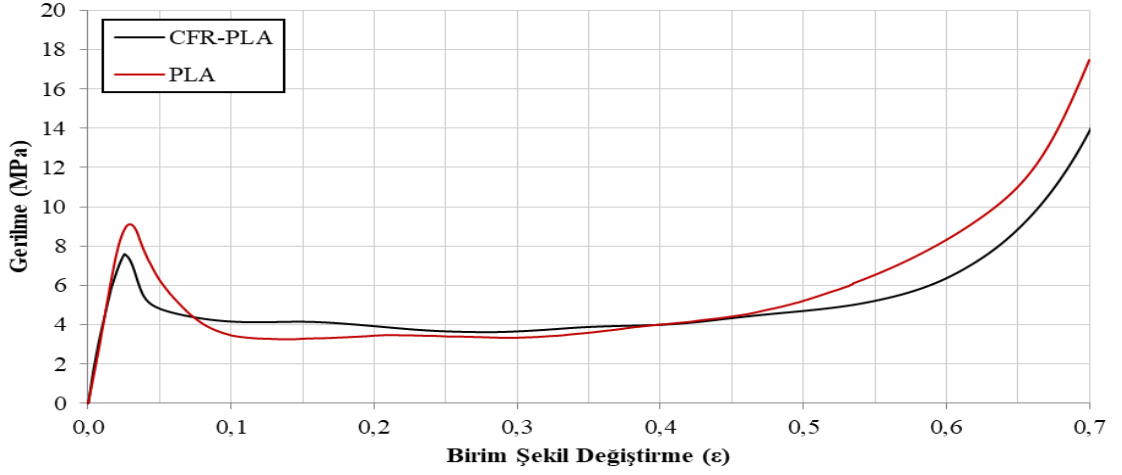


Şekil 4.27 : %60 izafi yoğunluklu yatay bal peteği birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

4.2.3.3 Dikey truss birim hücreesine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

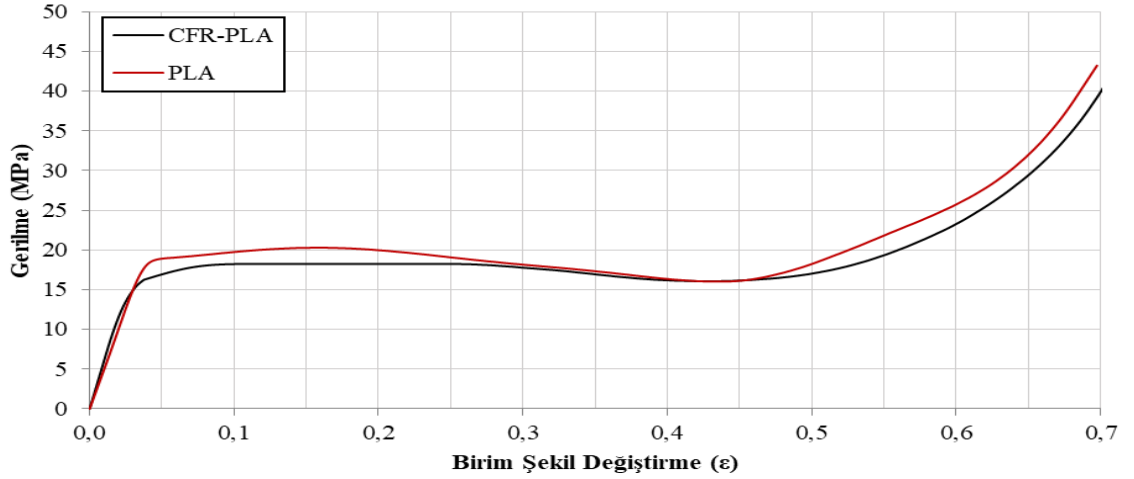
Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da, dikey truss birim hücreesine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.

Dikey truss % $\rho = 0,2$



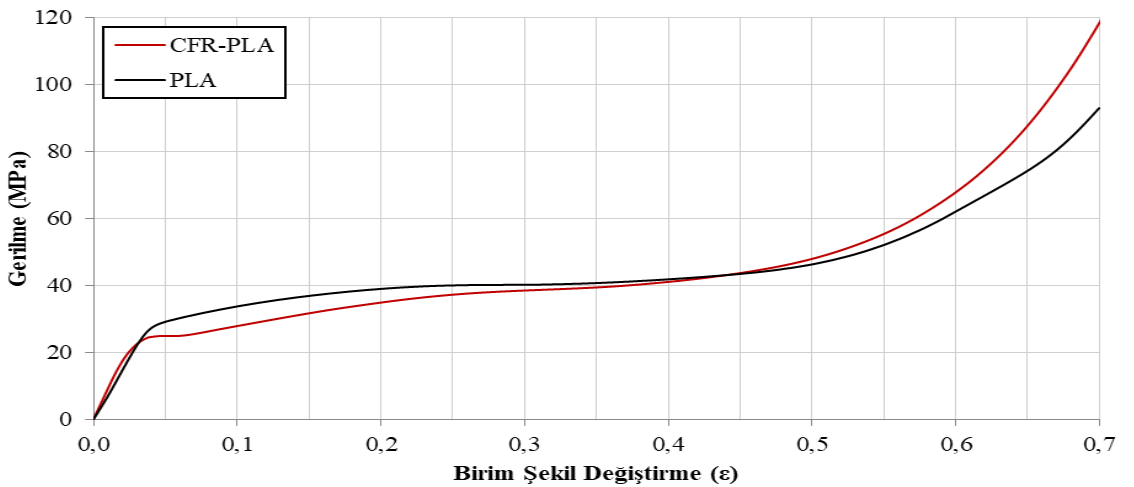
Şekil 4.28 : %20 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Dikey truss % $\rho = 0,4$



Şekil 4.29 : %40 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Dikey truss % $\rho = 0,6$

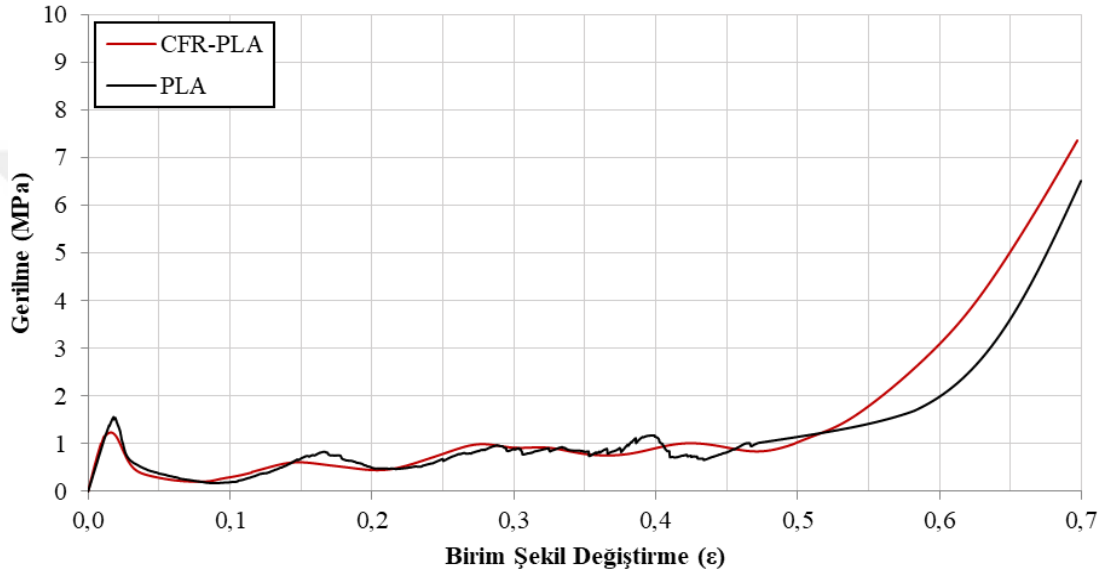


Şekil 4.30 : %60 izafi yoğunluklu dikey truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

4.2.3.4 Yatay truss birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

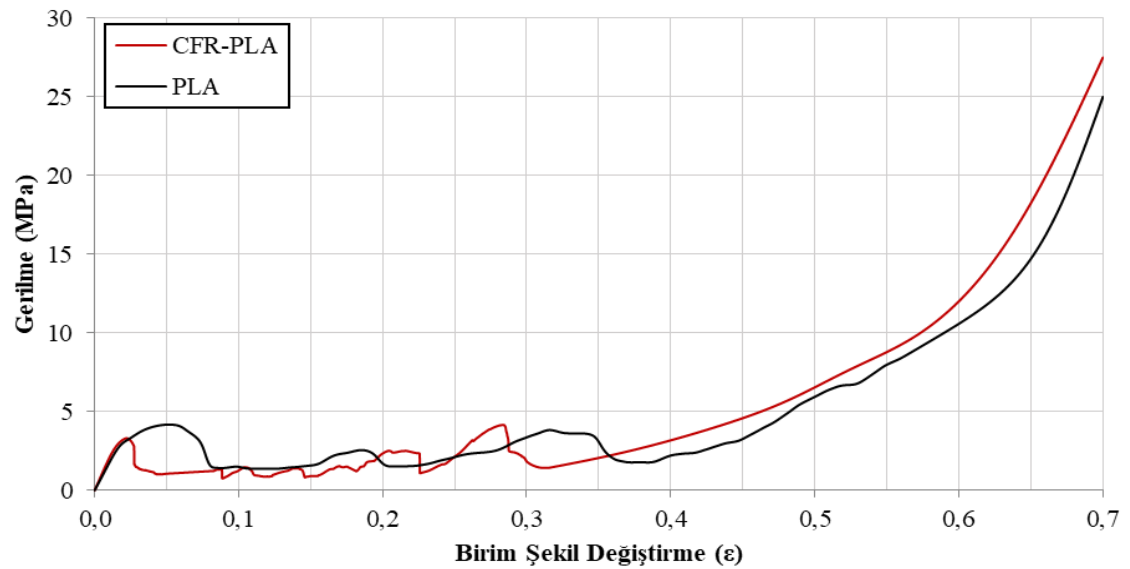
Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33’de, yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.

Yatay truss % $\rho = 0,2$



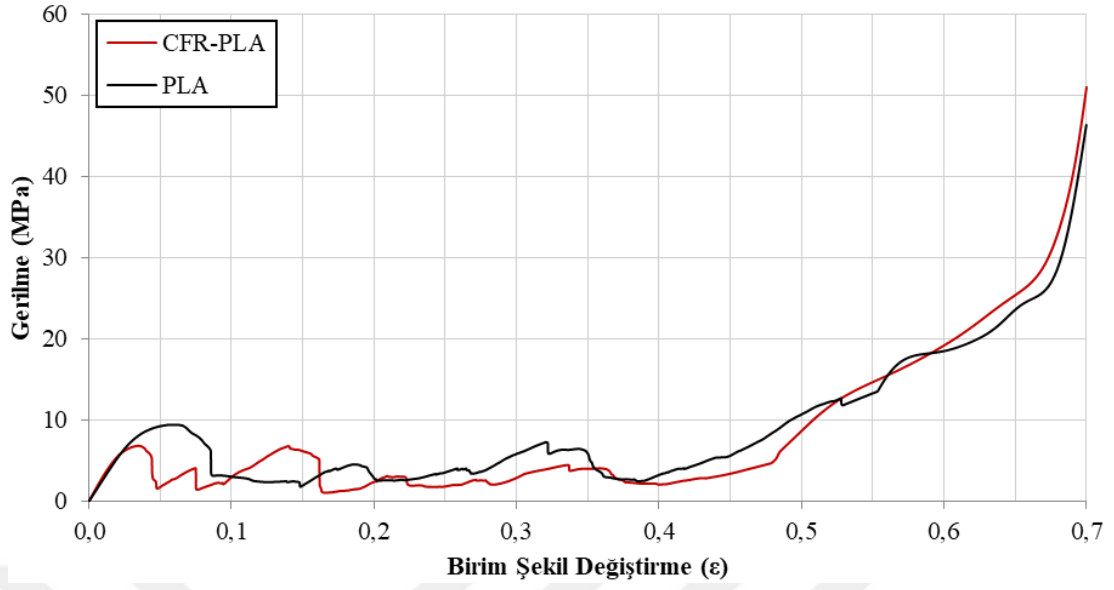
Şekil 4.31 : %20 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Yatay truss % $\rho = 0,4$



Şekil 4.32 : %40 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Yatay truss $\% \rho = 0,6$

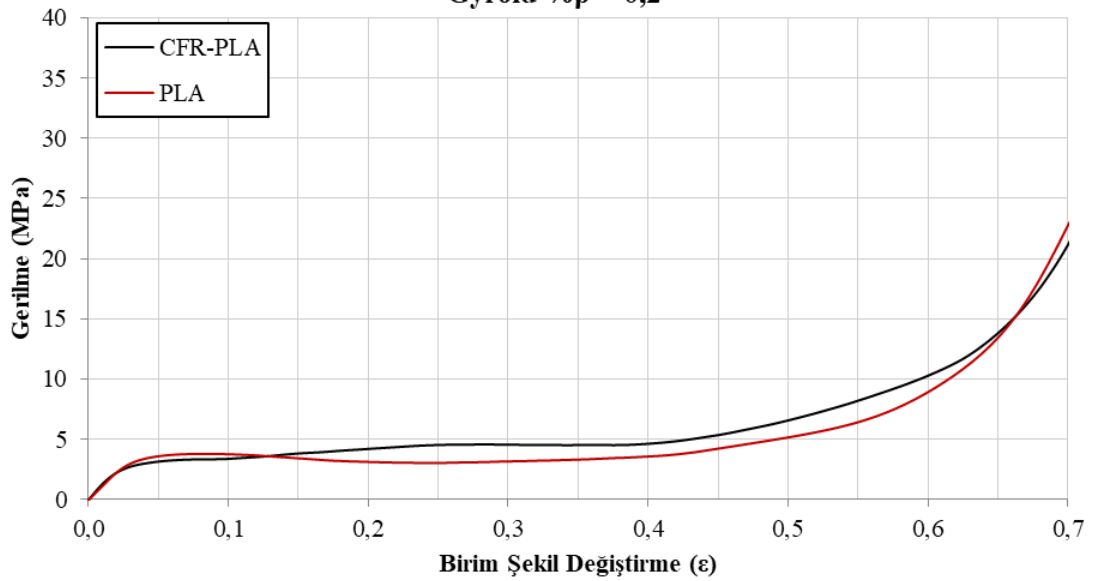


Şekil 4.33 : %60 izafi yoğunluklu yatay truss birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

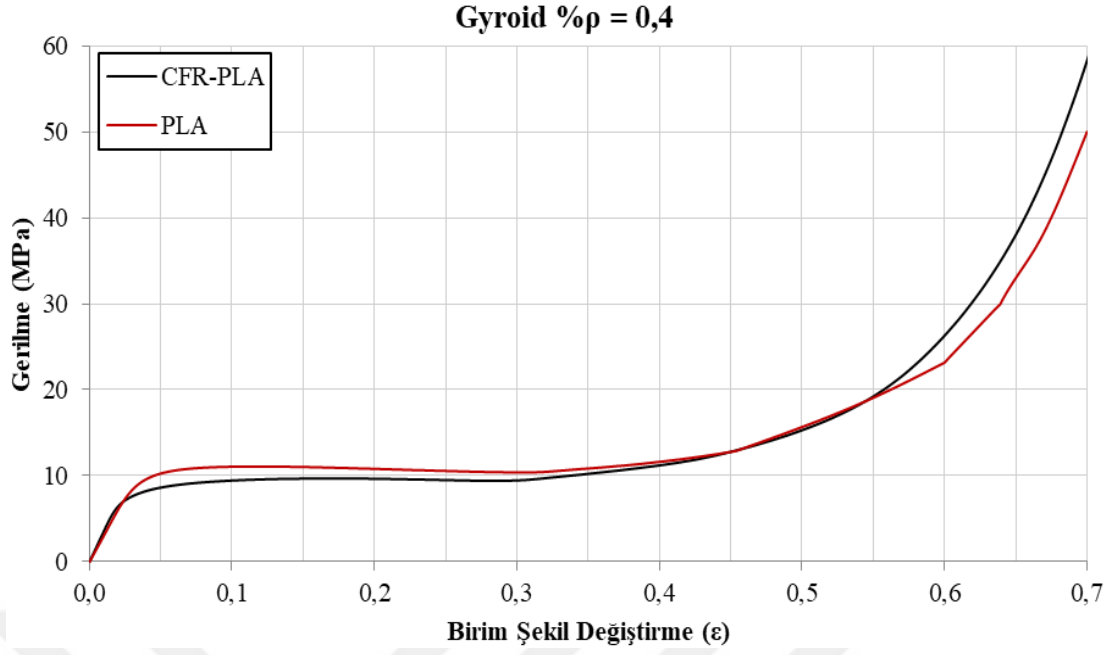
4.2.3.5 Gyroid birim hücresine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36’da, gyroid birim hücresine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.

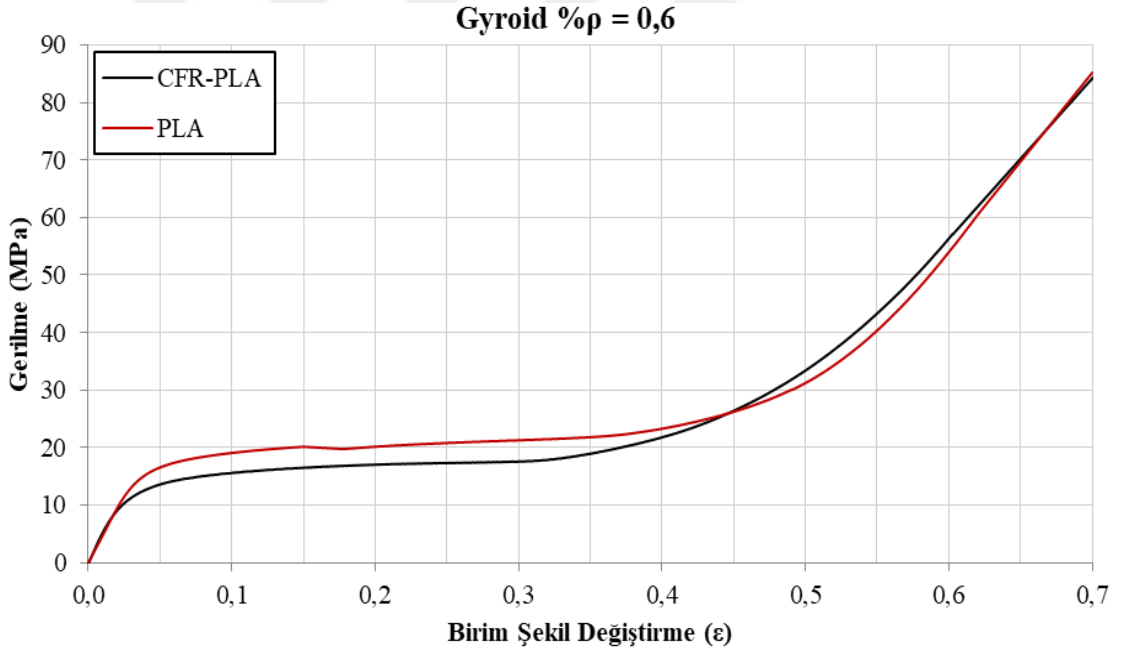
Gyroid $\% \rho = 0,2$



Şekil 4.34 : %20 izafi yoğunluklu gyroid birim hücresine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



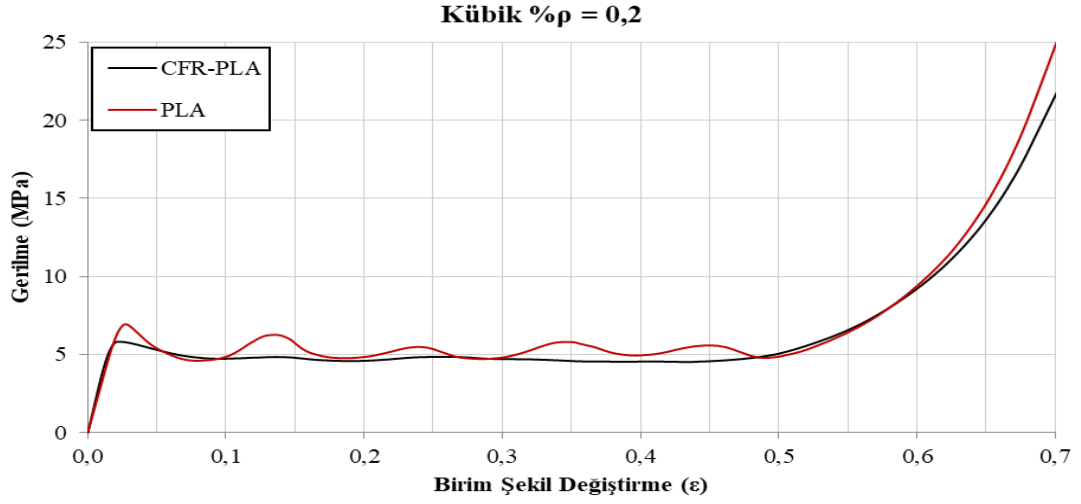
Şekil 4.35 : %40 izafi yoğunluklu gyroid birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



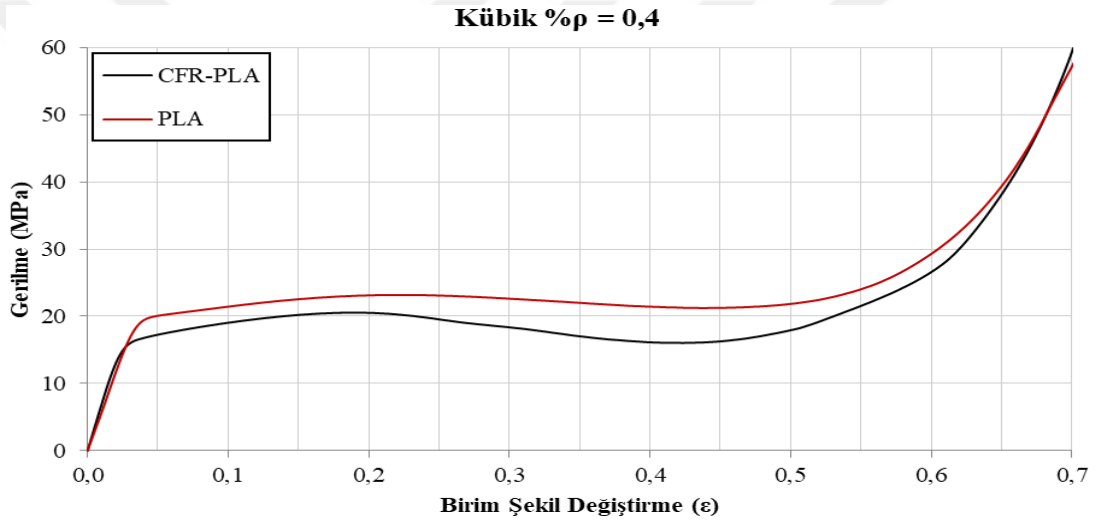
Şekil 4.36 : %60 izafi yoğunluklu gyroid birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

4.2.3.6 Kübik birim hücreesine sahip basma numuneleri için basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

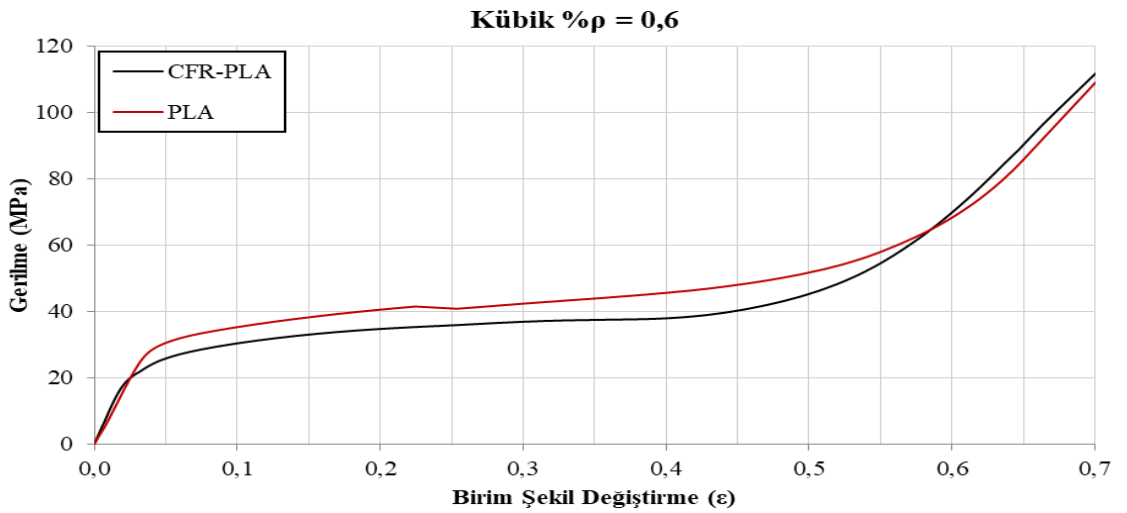
Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33’de, kübik birim hücreesine sahip basma numunelerine yapılan basma test sonuçları, gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri, PLA ve CFR-PLA malzemeleri için %20, %40 ve %60 izafi yoğunluk değerlerinde ayrı ayrı oluşturulmuştur.



Şekil 4.37 : %20 izafi yoğunluklu kübik birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



Şekil 4.38 : %40 izafi yoğunluklu kübik birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi



Şekil 4.39 : %60 izafi yoğunluklu kübik birim hücreesine sahip basma numunelerinin basma özelliklerinin malzemeye bağlı değişimi

4.3 Eğme Testi Sonuçları

Bu bölümde, EYM yöntemiyle üretilen hücresel çekirdeğe sahip sandviç paneller ile bu panellerin alt ve üst yüzeylerine karbon fiber plakaların yapıştırılmasıyla oluşturulmuş sandviç kompozitlerin eğme özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Sandviç kompozitlerin alt ve üst yüzeyinde, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş 8 kat dokuma karbon fiber kompozit plaka kullanılmıştır. Sandviç panelin ve sandviç kompozitin çekirdek kısmında ise %40 izafi yoğunluğuna sahip 5 farklı birim hücre şekli kullanılmıştır. Kullanılan birim hücre şekilleri yatay bal peteği, yatay truss, gyroid, kübik ve iskelettir. Üretilen eğme numunelerine yapılan testler sonucunda kuvvet – sehim eğrileri oluşturulmuştur. Kuvvet – sehim eğrileri kullanılarak, kompozit yapıya ait eğilme rijitliği, eğme dayanımı ve kopma anındaki şekil değişimi gibi özellikler belirlenmiştir.

4.3.1 Eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

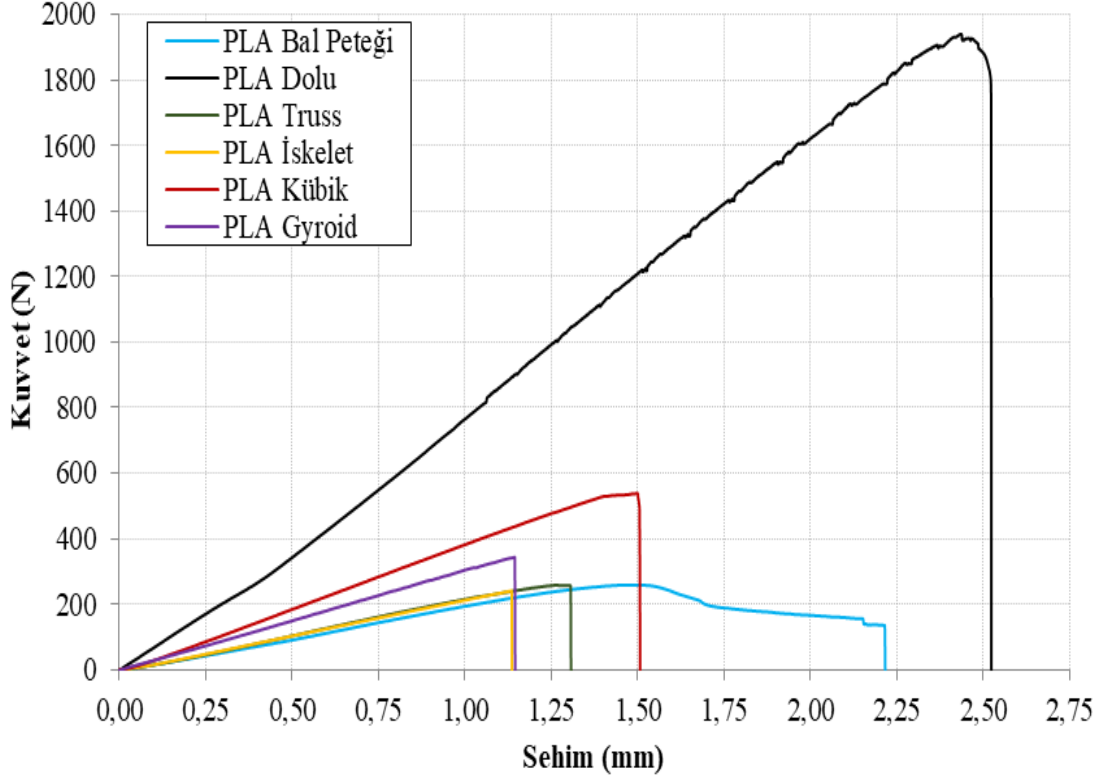
EYM yöntemiyle üretilen hücresel çekirdeğe sahip sandviç paneller ile bu panellerin alt ve üst yüzeylerine karbon fiber plakaların yapıştırılmasıyla oluşturulmuş sandviç kompozitlerin çekirdek bölümünde kullanılan farklı birim hücrelerin eğme özelliklerine etkisi bu bölümde incelenmiştir. Kullanılan birim hücre şeklinin, kuvvet – sehim eğrileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan eğme testleri ile açıkça ortaya konmuştur.

4.3.1.1 EYM ile üretilen numuneler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak oluşturulan sandviç panellerin, çekirdek bölümünde kullanılan yatay bal peteği, yatay truss, gyroid, kübik ve iskelet birim hücre şekilleri, yapının eğme özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Şekil 4.40’da, PLA malzemesi kullanılarak EYM ile üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi kuvvet – sehim eğrisi üzerinde gösterilmektedir.

Kuvvet - sehim eğrisi üzerinde önemli olan eğilme özelliklerinden biride eğilme rijitliğidir. Şekil 4.40’da gösterilen eğrinin elastik bölgedeki eğimi numunelerin eğilme rijitliğini tanımlamaktadır. Kuvvet – sehim eğrisinin eğiminin hesaplanmasıyla oluşturulmuş beş farklı birim hücre ve bir tane de tam dolu olmak üzere toplam altı

farklı numuneye ait eğilme rijitliği değerleri, Çizelge 4.5’de gösterilmektedir. Çizelge 4.5’de gösterilen diğer bir eğilme özelliği olan maksimum eğme kuvveti ise numunelerin dayanabileceği maksimum kuvvetini göstermektedir. Ayrıca, Çizelge 4.5’de numunelerin kopma anındaki şekil değişim miktarları olan kopma uzamaları da yer almaktadır.



Şekil 4.40 : EYM ile üretilen %40 izafi yoğunluğa sahip birim hücreler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

Çizelge 4.5, PLA malzemesinden EYM eklemeli üretim yöntemi kullanılarak üretilen, farklı birim hücrelere ait sandviç panellerin eğme özelliklerini göstermektedir. Kübik, gyroid, yatay bal peteği, yatay truss, iskelet birim hücrelerinden %40 izafi yoğunluğunda üretilmiş numunelere yapılan eğme testi sonucunda yapılara ait maksimum eğme kuvveti, eğilme rijitliği ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Yapılan testler sonucunda, aynı izafi yoğunluğa yani eşit kütleye sahip birim hücrelerin eğme özelliklerinin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Beş farklı birim hücre için en yüksek maksimum eğme kuvveti değeri, Çizelge 4.5’de kübik birim hücresine sahip numune için 525 N olarak okunmaktadır. En düşük maksimum eğme kuvveti ise iskelet birim hücresine sahip numunede 240 N olarak gözlemlenmiştir. Yapının elastik bölgede şekil değiştirme direnci olarak tanımlanabilecek eğilme rijitliği değerleri karşılaştırıldığında, en büyük eğilme rijitliğine sahip yapının kübik

ve en küçük eğilme rijitliğine sahip yapının ise bal peteği olduğu Çizelge 4.5 üzerinde görülmektedir. Yine beş farklı birim hücre kullanılarak üretilen numunelerin kopma anındaki şekil değiştirme miktarları, kopma uzaması olarak tanımlanmıştır. En yüksek kopma uzamasına bal peteği birim hücresinden üretilen numune sahipken, en düşük kopma uzaması iskelet birim hücresi kullanılarak üretilen numunede gözlemlenmiştir.

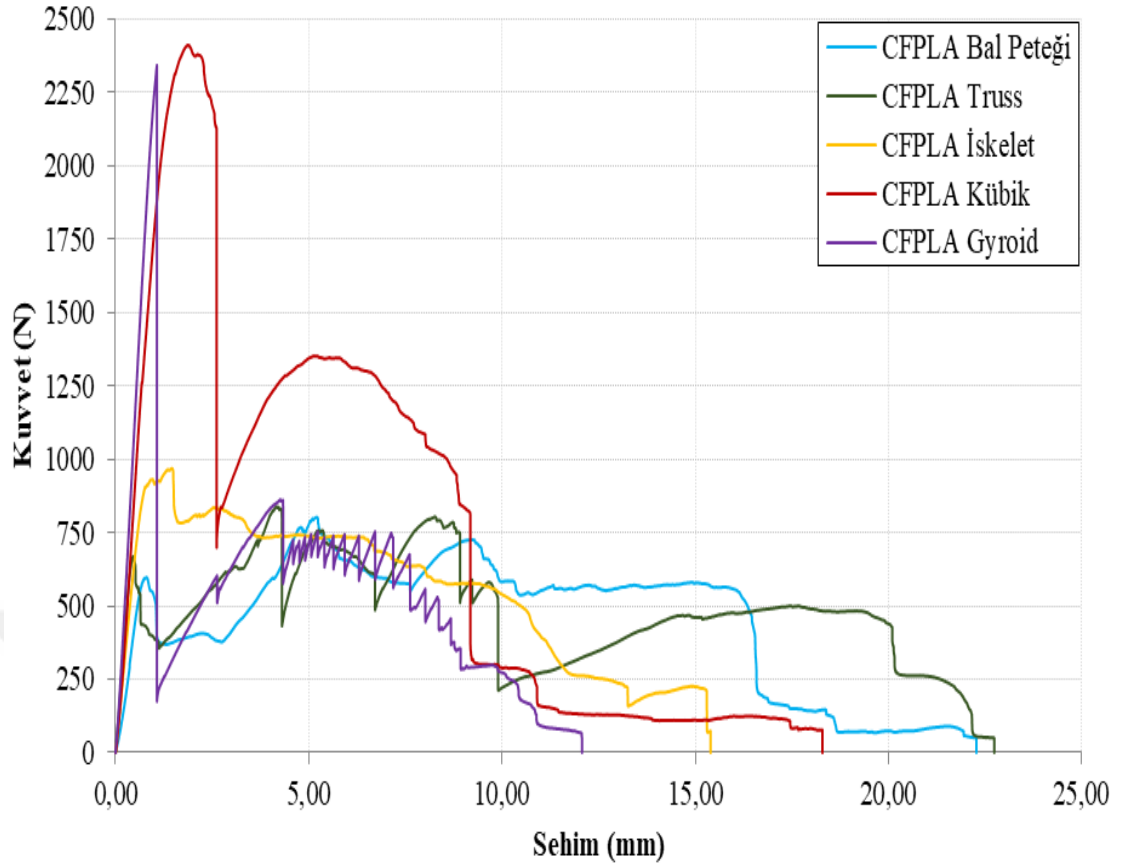
Çizelge 4.5 : Farklı birim hücelere sahip sandviç paneller için eğme özelliklerinin karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	Max. eğme kuvveti (N)	Eğilme rijitliği (N/mm)	Kopma uzaması (mm)
Dolu	1920	680	2,52
Kübik	525	370	1,50
Gyroid	345	295	1,16
Bal peteği	260	180	2,20
Truss	255	210	1,30
İskelet	240	205	1,14

4.3.1.2 Kompozit sandviç numuneler için eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi

EYM yöntemiyle %40 izafi yoğunlukta üretilen hücresel çekirdeğe sahip sandviç panellerin alt ve üst yüzeylerine karbon fiber plakaların yapıştırılmasıyla oluşturulmuş sandviç kompozitlerin eğme özellikleri bu bölümde incelenmiştir. Şekil 4.41’de, karbon fiber plakalı sandviç kompozit numuneler için eğme özelliklerinin çekirdek birim hücre şekline bağlı değişimi kuvvet – sehim eğrisi üzerinde gösterilmektedir.

Şekil 4.41’de gösterilen kuvvet –sehim eğrisine bakıldığında, farklı birim hücelere sahip eğme numunelerine ait maksimum eğme kuvveti, eğilme rijitliği ve kopma uzaması gibi eğilme özellikleri belirlenebilir. Şekil 4.41’de kuvvet – sehim eğrisine bakıldığında, uygulanan kuvvete karşılık gerçekleşen şekil değişiminin elastik bölgede lineer bir şekilde değiştiği görülmektedir. Gerçekleşen bu lineer doğrunun eğimi yapının eğilme rijitliğini vermektedir. Kuvvet – sehim eğrisi üzerinde ulaşılan en yüksek kuvvet değeri maksimum eğme kuvvetidir. Yapının kopma anındaki şekil değiştirme miktarı ise kopma uzaması olarak tanımlanabilir.



Şekil 4.41 : Karbon fiber plakalı sandviç kompozit numuneler için eğme özelliklerinin çekirdek birim hücre şekline bağlı değişimi

Çizelge 4.6, farklı birim hücrelere sahip kompozit sandviç numuneler için maksimum eğme kuvveti, eğilme rijitliği ve kopma uzaması gibi eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimini göstermektedir. Yapılan testler sonucunda aynı izafi yoğunluğa yani eşit kütleyle sahip kübik, gyroid, bal peteği, truss, iskelet birim hücrelerinden oluşan kompozit numunelerin eğme özelliklerinin birim hücre şekline bağlı olarak farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Beş farklı birim hücrenin sandviç kompozitin çekirdek bölümünde kullanılmasıyla üretilmiş sandviç kompozitler için en yüksek maksimum eğme kuvveti değeri, Çizelge 4.6’da kübik birim hücrelerine sahip numune için 2410 N olarak okunmaktadır. En düşük maksimum eğme kuvveti ise bal peteği birim hücrelerine sahip numunede 800 N olarak gözlemlenmiştir. Yapının elastik bölgede şekil değiştirme direnci olarak tanımlanabilecek eğilme rijitliği değerleri karşılaştırıldığında, en büyük eğilme rijitliğine sahip yapının 2300 N/mm ile gyroid ve en küçük eğilme rijitliğine sahip yapının ise 800 N/mm değeri ile bal peteği olduğu çizelge 4.6’da görülmektedir. Beş farklı birim hücre kullanılarak üretilen numunelerin kopma anındaki şekil değiştirme miktarları, kopma uzaması olarak tanımlanmıştır. En

yüksek kopma uzamasına truss birim hücresinden üretilen numune sahipken, en düşük kopma uzaması gyroid birim hücresi kullanılarak üretilen numunede gözlemlenmiştir.

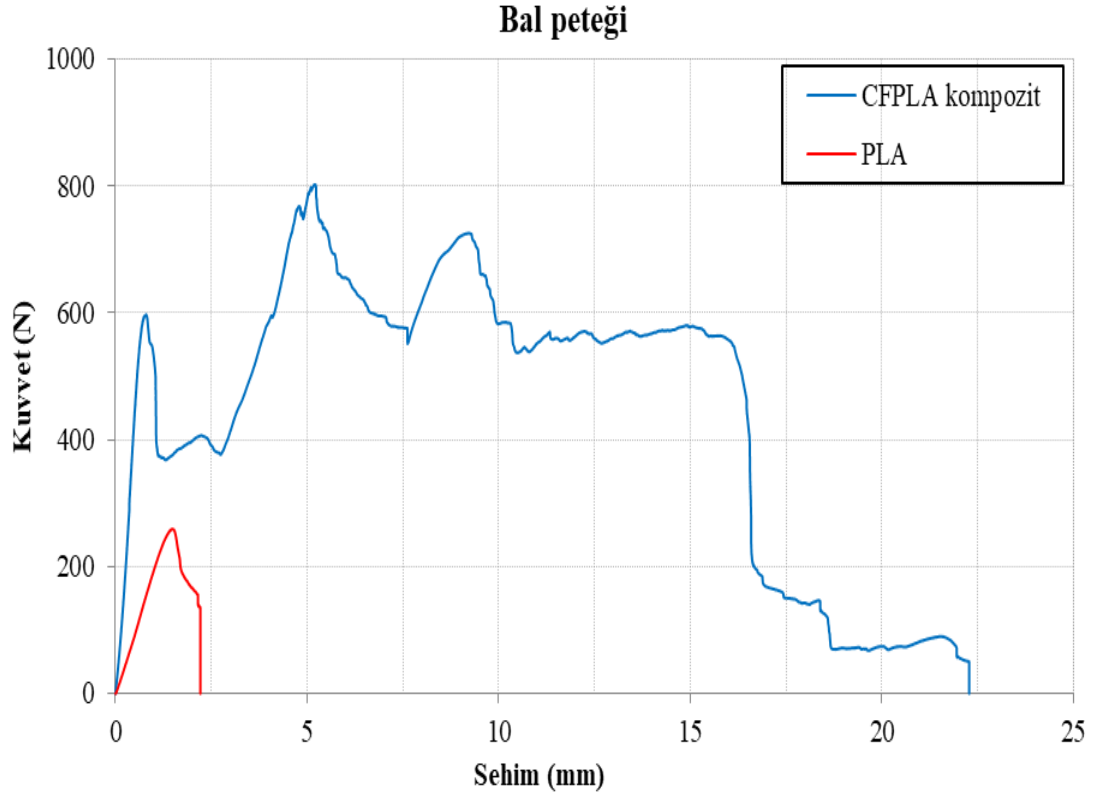
Çizelge 4.6 : Farklı birim hücelere sahip sandviç kompozit eğme numuneleri için eğme özelliklerinin karşılaştırılması

Birim hücre şekilleri	Max. eğme kuvveti (N)	Eğilme rijitliği (N/mm)	Kopma uzaması (mm)
Kübik	2410	1850	18,3
Gyroid	2350	2300	12,1
Bal peteği	800	800	22,3
Truss	840	1700	22,7
İskelet	970	1350	15,4

4.3.2 EYM ile üretilen numunelere yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

EYM ile üretilmiş periyodik hücreli çekirdeğe sahip sandviç paneller ile üretilen bu panellerin alt ve üst yüzeylerine yapıştırılan karbon fiber plakaların eklenmesiyle oluşturulmuş sandviç kompozitlerin eğme özellikleri bu bölümde karşılaştırılmıştır. Sandviç panellerin ve sandviç kompozitlerin çekirdek kısmında, bal peteği, truss, iskelet, kübik ve gyroid birim hücreleri kullanılmıştır. Her birim hücre için kuvvet – sehim eğrileri ayrı ayrı oluşturularak sandviç panellere yapılan karbon fiber takviyesinin eğilme özelliklerine etkisi gözlemlenmiştir.

Şekil 4.42, bal peteği birim hücresinden PLA malzemesi kullanılarak üretilen sandviç panele yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisini, kuvvet – sehim eğrisi üzerinde göstermektedir. Bal peteği birim hücresinden PLA kullanılarak üretilen sandviç panel için maksimum eğme kuvveti 260 N iken karbon fiber takviyeli kompozitin (CFPLA kompozit) maksimum eğme kuvveti 800 N dur. Alt ve üst yüzeylere yapılan karbon fiber takviyesi maksimum eğme kuvvetini yaklaşık olarak 3 kat arttırmıştır. Eğilme rijitliği değerleri kıyaslandığında ise; bal peteği birim hücresinden PLA kullanılarak üretilen sandviç panel için eğilme rijitliği değeri 180 N/mm iken karbon fiber takviyeli kompozitin eğilme rijitliği değeri 800 N/mm bulunmuştur.

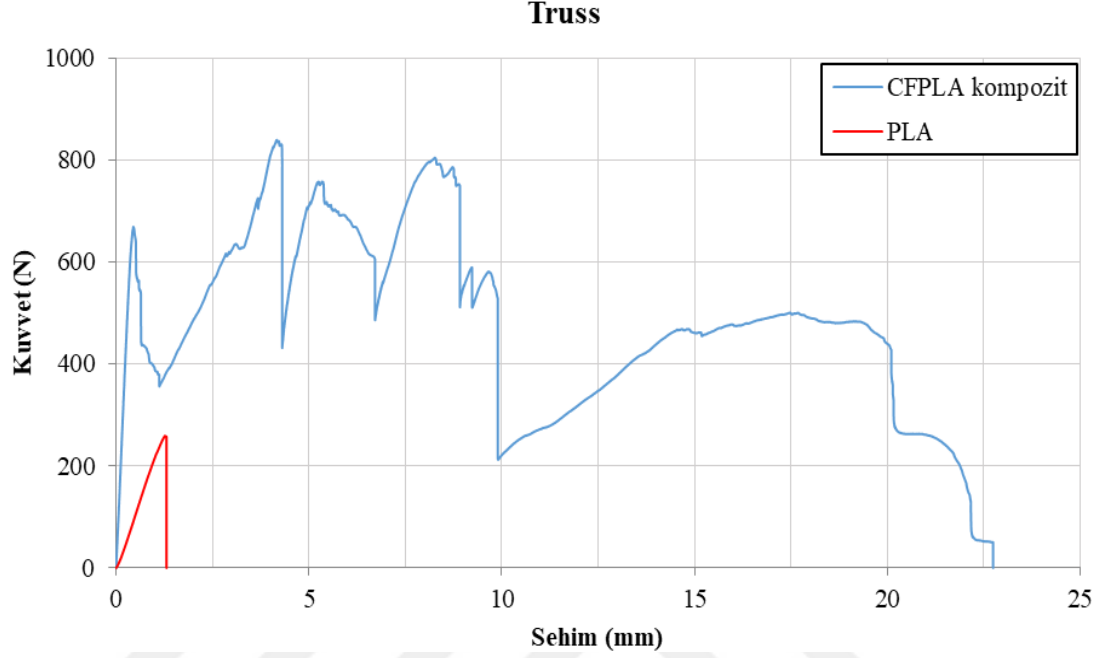


Şekil 4.42 : Bal peteği birim hücreesine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

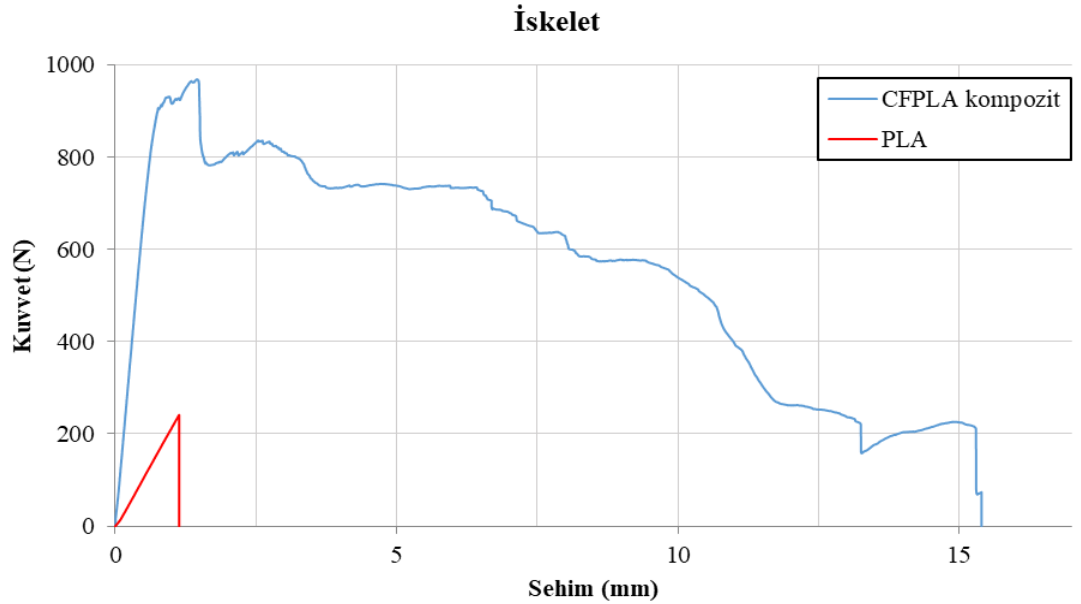
Şekil 4.43, truss birim hücrelerinden PLA malzemesi kullanılarak üretilen sandviç panele yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisini, kuvvet – sehim eğrisi üzerinde göstermektedir. Truss birim hücrelerinden PLA kullanılarak üretilen sandviç panel için maksimum eğme kuvveti 255 N iken karbon fiber takviyeli kompozitin maksimum eğme kuvveti 840 N dur. Alt ve üst yüzeylere yapılan karbon fiber takviyesi maksimum eğme kuvvetini yaklaşık olarak 3,5 kat arttırmıştır. Eğilme rijitliği değerleri kıyaslandığında ise; truss birim hücrelerinden PLA kullanılarak üretilen sandviç panel için eğilme rijitliği değeri 210 N/mm iken karbon fiber takviyeli kompozitin eğilme rijitliği değeri 1700 N/mm bulunmuştur. Sandviç panele yapılan karbon fiber takviyesi sonucunda eğilme rijitliği değeri yaklaşık olarak 8 kat artmıştır.

Şekil 4.44, iskelet birim hücrelerinden PLA malzemesi kullanılarak üretilen sandviç panele yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisini, kuvvet – sehim eğrisi üzerinde göstermektedir. İskelet birim hücrelerinden üretilen sandviç panel için maksimum eğme kuvveti 240 N iken karbon fiber takviyeli kompozitin maksimum eğme kuvveti 970 N dur. Alt ve üst yüzeylere yapılan karbon fiber takviyesi maksimum eğme kuvvetini yaklaşık olarak 4 kat arttırmıştır. Eğilme rijitliği değerleri kıyaslandığında ise; iskelet birim hücrelerinden PLA kullanılarak üretilen

sandviç panel için eğilme rijitliği değeri 205 N/mm iken karbon fiber takviyeli kompozitin eğilme rijitliği değeri 1350 N/mm bulunmuştur. Sandviç panele yapılan karbon fiber takviyesi sonucunda, sandviç kompozitin eğilme rijitliği değeri yaklaşık olarak 6,5 kat artmıştır.



Şekil 4.43 : Truss birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

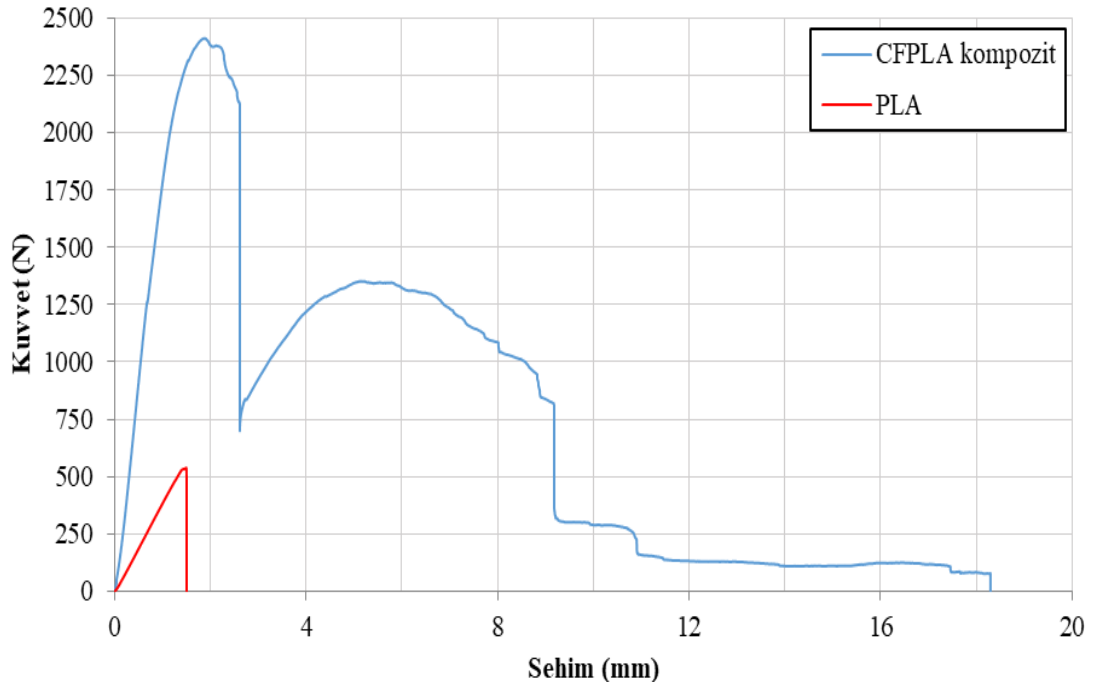


Şekil 4.44 : İskelet birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

Şekil 4.45, kübik birim hücresinden PLA malzemesi kullanılarak üretilen sandviç panele yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisini, kuvvet –

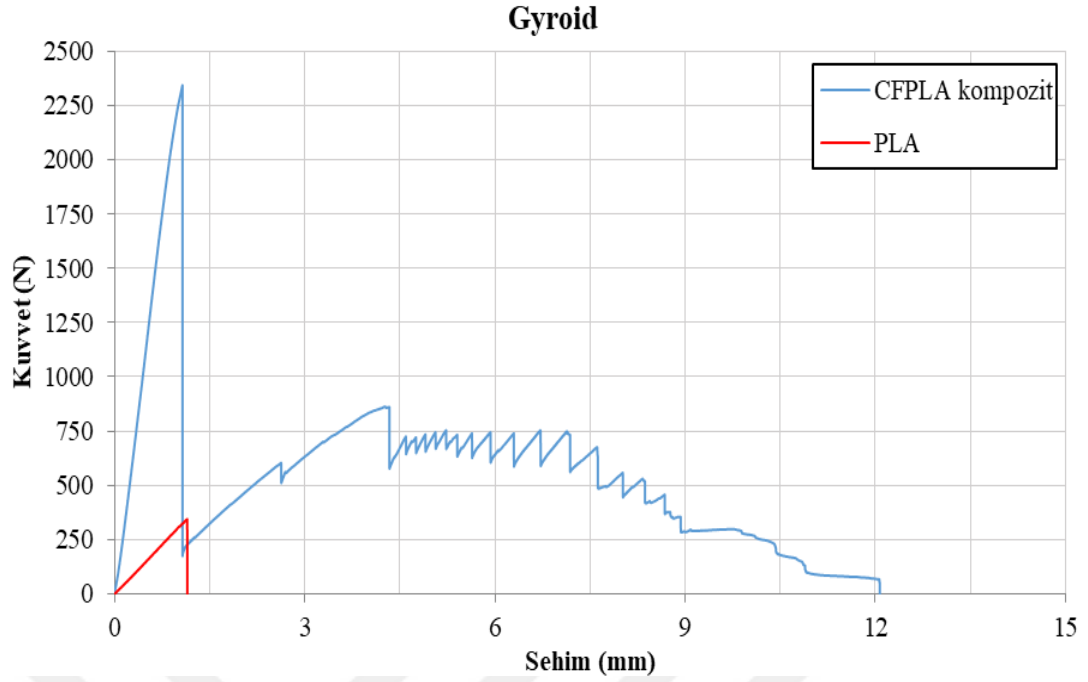
sehim eğrisi üzerinde göstermektedir. Kübik birim hücrelerinden üretilen sandviç panel için maksimum eğme kuvveti 525 N iken karbon fiber takviyeli kompozitin maksimum eğme kuvveti 2410 N'dir. Alt ve üst yüzeylere yapılan karbon fiber takviyesi maksimum eğme kuvvetini yaklaşık olarak 4,5 kat arttırmıştır. Eğilme rijitliği değerleri kıyaslandığında ise; sandviç panel için eğilme rijitliği değeri 370 N/mm iken karbon fiber takviyeli kompozitin eğilme rijitliği değeri 1850 N/mm bulunmuştur. Kübik birim hücrelerinin, diğer birim hücrelere kıyasla en yüksek maksimum eğme kuvveti ve eğilme rijitliği değerlerine sahip olduğu Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da açıkça görülmektedir.

Kübik



Şekil 4.45 : Kübik birim hücrelerine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

Şekil 4.46, gyroid birim hücrelerinden PLA malzemesi kullanılarak üretilen sandviç panele yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisini, kuvvet – sehim eğrisi üzerinde göstermektedir. Gyroid birim hücrelerinden üretilen sandviç panel için maksimum eğme kuvveti 345 N iken karbon fiber takviyeli kompozitin maksimum eğme kuvveti 2350 N'dir. Alt ve üst yüzeylere yapılan karbon fiber takviyesi maksimum eğme kuvvetini yaklaşık olarak 7 kat arttırmıştır. Eğilme rijitliği değerleri kıyaslandığında ise; gyroid birim hücrelerinden üretilen sandviç panel için eğilme rijitliği değeri 295 N/mm iken karbon fiber takviyeli kompozitin eğilme rijitliği değeri 2300 N/mm bulunmuştur.



Şekil 4.46 : Gyroid birim hücresine sahip eğme numunelerine yapılan karbon fiber plaka takviyesinin eğme özelliklerine etkisi

Yukarıda verilen kuvvet – sehim eğrilerine bakıldığında EYM ile üretilen numunelere yapılan karbon fiber plaka takviyesi sonucunda, karbon fiber takviyeli sandviç kompozitlerin, maksimum eğme kuvveti ve eğilme rijitliği değerlerinin sandviç panellere kıyasla oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca kuvvet – sehim eğrisi altında kalan alan yapının emebileceği enerji miktarının bir ölçüsü olduğundan dolayı, karbon fiber takviyeli sandviç kompozitler, EYM ile üretilmiş sandviç panellere kıyasla oldukça fazla enerji emebilmektedir.

EYM ile üretilen sandviç panellere uygulanan eğme yükü neticesinde yapı ani bir şekilde kırılırken, karbon fiber takviyeli sandviç kompozit eğme numunelerinde deformasyon kademeli bir şekilde gerçekleşmektedir. Karbon fiber plaka takviyeli sandviç kompozitler için deformasyon, kayma gerilmelerine maruz kalan hücresel yapıların zamanla yavaş yavaş kırılmasıyla gerçekleşmiştir. Belli bir değere gelen kuvvet değeri hücresel yapının dayanabileceği maksimum eşiğe geldiğinde hücresel yapı kırılmakta ve kuvvette ani bir düşüş gözlemlenmektedir, daha sonra aynı durum diğer hücreler için gerçekleşmekte ve yapı zamanla deforme olmaktadır.

Beş farklı birim hücre şekli için en yüksek eğme dayanımı büyükten küçüğe sırasıyla, kübik, gyroid, iskelet, truss ve bal peteği birim hücrelerinde gözlemlenmektedir. Elastisite modülü değerleri ise büyükten küçüğe sırasıyla, gyroid, kübik, iskelet, truss ve bal peteği birim hücresine sahip sandviç kompozitlerde gözlemlenmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 3 boyutlu eklemeli üretim yöntemlerinden EYM ile üretilmiş hücresel kafes yapılı sandviç panellerin mekanik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için periyodik hücresel yapıya sahip eğme ve basma numuneleri; yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, gyroid, kübik ve iskelet birim hücre şekilleri kullanılarak ilgili standartta belirtilen numune boyutlarında tasarlanılmışlardır. Numunelerin izafi yoğunluk değerleri, birim hücre boyutları değiştirilmeksizin sadece birim hücre kalınlıkları değiştirilerek %20, %40, %60 olacak şekilde ayarlanmıştır. Basma numuneleri PLA ve CFR-PLA, eğme numuneleri ise PLA malzemesi kullanılarak Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısı ile belirlenen işleme parametrelerinde üretilmiştir. Ayrıca EYM yöntemi ile üretilen periyodik hücresel çekirdeğe sahip eğme numunelerinin alt ve üst yüzeylerine, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen karbon fiber plakalar epoksi temelli yapıştırıcı ile yapıştırılarak sandviç kompozit numuneler üretilmiştir. Yapılan çekme, basma ve üç nokta eğme mekanik testleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.1 Sonuçlar

- Frosh ticari markası tarafından üretilen PLA ve CFR-PLA filamentleri için en iyi dayanım değerlerinin hangi işleme sıcaklığında elde edildiğini bulmak amacıyla 200, 210, 220 ve 230 °C işleme sıcaklarında üretilen numunelere çekme testi yapılmıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda, 220 °C işleme sıcaklığında PLA filamentleri için en yüksek çekme dayanımı 53,9 MPa, elastisite modülü 3 GPa ve kopma uzaması ise %17,7 olarak bulunmuştur. CFR-PLA filamentleri için ise 210 °C işleme sıcaklığında üretilen numune için en yüksek çekme dayanımı 30,5 MPa, elastisite modülü 2,6 GPa, kopma uzaması ise %5,8 olarak bulunmuştur. Elde edilen çekme testleri sonucunda, Ultimaker/3 extended üç boyutlu yazıcısında işleme sıcaklıkları; PLA filamentleri için 220 °C ve CFR-PLA filamentleri için de 210 °C olarak belirlenmiştir.

- CFR-PLA filamenti için mekanik özelliklerin ilave edilen karbon fiber takviyesinden dolayı daha yüksek olması beklenirken, yapılan testler sonucunda PLA filamentinin daha yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin, CFR-PLA filamentinde bulunan karbon fiber takviyelerinin, malzeme içerisinde dayanıklı bir ara yüzey oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuçların daha önce yapılan çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir [87].
- Periyodik hücreli kafes yapıları için basma özelliklerinin birim hücre şekline bağlı değişimi, yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik ve gyroid birim hücre şekilleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Farklı birim hücre şekillerine sahip numunelere yapılan basma testleri sonucunda en yüksek basma dayanımı değerlerinin çekme baskın deformasyon davranışına sahip dikey bal peteği, dikey truss ve kübik birim hücrelerine sahip numunelerde gözlemlendiği görülmüştür. Eğme baskın davranış gösteren yatay bal peteği ve yatay truss birim hücreleri ise daha düşük basma dayanımına sahiptir.
- Periyodik hücreli kafes yapıları için basma numuneleri %20, %40 ve %60 izafi yoğunluklarında üretilmiştir. Farklı izafi yoğunluklara sahip numunelere yapılan basma testi sonucunda yapının elastisite modülü ve elastik bölgede kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği maksimum gerilme değerleri, izafi yoğunluğun artmasıyla, farklı birim hücre şekilleri için farklı oranlarda artış göstermiştir.
- PLA ve CFR-PLA malzemesi kullanılarak, aynı birim hücre şekillerine ve eşit izafi yoğunluğa sahip numunelere yapılan basma testi sonucunda elde edilen gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, eğrilerin birbirlerine benzer şekilde olduğu, yani deformasyon tiplerinin benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte PLA malzemesi kullanılarak üretilen basma numuneleri daha yüksek basma dayanımına sahipken, CFR-PLA malzemesinden üretilen numunelerin elastisite modülleri daha yüksektir.
- %40 izafi yoğunluğa sahip eğme numuneleri, kübik, gyroid, yatay bal peteği, yatay truss ve iskelet birim hücreleri kullanılarak EYM yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen numunelere yapılan eğme test sonucunda, birim hücre şeklinin maksimum eğme kuvveti, eğilme rijitliği ve kopma uzamasına olan etkileri incelenmiştir. Beş farklı

birim hücre için en yüksek maksimum eğme kuvveti kübik birim hücresine sahip numunede gözlemlenirken, en düşük maksimum eğme kuvveti ise iskelet birim hücresine sahip numunede gözlemlenmiştir.

- EYM yöntemiyle üretilen farklı birim hücre şekillerine sahip sandviç panellerin alt ve üst yüzeylerine karbon fiber plakaların yapıştırılmasıyla oluşturulmuş sandviç kompozitlerin eğme özellikleri incelendiğinde, sandviç kompozitin eğilme rijitliğinin ve maksimum eğme kuvvetinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

5.2 Öneriler

- Bu tez çalışmasında kullanılan birim hücrelerin boyutları 5mm×5mm olacak şekilde sabit tutulmuştur ve izafi yoğunluk birim hücre kalınlığının değiştirilmesiyle %20, %40 ve %60 olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonraki çalışmalarda birim hücre boyutu değiştirilerek(örneğin; 2,5mm×2,5mm) yine %20, %40 ve %60 izafi yoğunluklara sahip numuneler üretilebilir ve üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin birim hücre boyutuna bağlı değişimi incelenebilir.
- CFR-PLA filamentinden üretilen numuneler için SEM veya benzeri mikroskobik görüntülerin elde edilmesinin, karbon fiberlerin malzeme içerisindeki dağılımı ve yönelimi hakkında bilgi verecek olmasından dolayı, yapılara ait SEM görüntülerinin incelenmesi tavsiye edilmektedir.
- PLA filamentinde bulunan CF miktarının değiştirilmesinin basma ve eğme özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi bir sonraki çalışmanın konusu olarak düşünülebilir.
- Daha sonra yapılacak çalışmalarda, akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), Polieter Eter Keton (PEEK), glikolle modifiye edilmiş polietilentereftalat (PETG) gibi farklı termoplastik filamentler kullanılarak malzeme özelliklerinin mekanik özelliklere etkileri incelenebilir.
- Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile üretilen numune sayısı ve dolayısıyla zamandan tasarruf sağlayabilir. Böylece hücresel kafes yapıları için farklı birim hücre şekilleri, birim hücre boyutları, izafi yoğunluk değerleri ve malzemeler gibi birçok çeşitli parametrelerin mekanik özelliklere etkisi üzerine daha detaylı çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Schaedler, T. A., & Carter, W. B.** (2016). Architected Cellular Materials, *Annual Review of Materials Research*, 46 (1), 187–210.
- [2] **Carlsson, L. A., & Kardomateas, G. A.** (2011). *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, London and New York, Springer Science & Business Media.
- [3] **Zenkert, D.** (1995). *An Introduction to Sandwich Construction*, Engineering Materials Advisory Services. London, Chameleon Press Ltd.
- [4] **Zenkert, D., & Nordisk, I.** (1997). *The handbook of sandwich construction*, Cradley heath. West Midlands.: Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS).
- [5] **Gibson, L. J., & Ashby, M. F.** (1999). *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge University Press.
- [6] **Allen, H. G.** (2013). *Analysis and design of structural sandwich panels, The commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*. Southampton, Elsevier.
- [7] **Davalos, J. F., Qiao, P., Frank Xu, X., Robinson, J., & Barth, K. E.** (2001). Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications, *Composite Structures*, 52(3-4), 441–452.
- [8] **Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R. K.** (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing*, 19, 167–183.
- [9] **Pattanayak, D. K., Fukuda, A., Matsushita, T., Takemoto, M., Fujibayashi, S., Sasaki, K., & Kokubo, T.** (2011). Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: Fabrication by selective laser melting and chemical treatments, *Acta Biomaterialia*, 7(3), 1398–1406.
- [10] **Jain, P., & Pradeep, T.** (2005). Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foam as an antibacterial water filter, *Biotechnology and Bioengineering*, 90(1), 59–63.
- [11] **Haack, D.P., Butcher, K.R., Kim, T., & Lu, T. J.** (2001) Novel lightweight metal foam heat exchangers. New York, *ASME Congress Proceedings*.
- [12] **Simone, A. E., & Gibson, L. J.** (1998). Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Materialia*, 46(6), 2139–2150.
- [13] **Triantafillou, T. C., & Gibson, L. J.** (1987). Failure mode maps for foam core sandwich beams, *Materials Science and Engineering*, 95, 37–53.

- [14] **Ju, J., Summers, J. D., Ziegert, J., & Fadel, G.** (2012). Design of Honeycombs for Modulus and Yield Strain in Shear, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134(1), 011002.
- [15] **Deshpande, V. S., Fleck, N. A., & Ashby, M. F.** (2001). Effective properties of the octet-truss lattice material, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747–1769.
- [16] **Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., & Hermenean, K.** (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance, *Composite Structures*, 200, 886–909.
- [17] **Gibson, L. J.** (2003). *Cellular Solids*, MRS Bulletin, 28(04), 270–274.
- [18] **Meza, L. R., Zelhofer, A. J., Clarke, N., Mateos, A. J., Kochmann, D. M., & Greer, J. R.** (2015). Resilient 3D hierarchical architected metamaterials, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(37), 11502–11507.
- [19] **Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., & Spadaccini, C. M.** (2014). Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials, *Science*, 344(6190), 1373–1377.
- [20] **Wadley, H. N.** (2006). Multifunctional periodic cellular metals, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31–68.
- [21] **Lu, T., Valdevit, L., & Evans, A.** (2005). Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores, *Progress in Materials Science*, 50(7), 789–815.
- [22] **Haghpanah, B., Salari-Sharif, L., Pourrajab, P., Hopkins, J., & Valdevit, L.** (2016). Multistable Shape-Reconfigurable Architected Materials, *Advanced Materials*, 28(36), 7915–7920.
- [23] **Tan, H., & Qu, S.** (2010). Impact of cellular materials; *cellular and porous materials in structures and processes*. New York, NY: Springer, 309-334
- [24] **Lee, D., H.** (2016). *Deformation Behavior of Honeycomb Foams in Compression*, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 1434728)
- [25] **Reid, S. R., & Peng, C.** (1997). Dynamic uniaxial crushing of wood, *International Journal of Impact Engineering*, 19(5-6), 531–570.
- [26] **Wadley, H., N., G.** (2002). Cellular Metals Manufacturing, *Advanced Engineering Materials*, 4(10), 726–733.
- [27] **Bunga, P., K.** (2014). *Mechanical Properties of 3-D Printed Cellular Foams with triangular cells*, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 1566503)
- [28] **Lunt, J.** (1998). Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers, *Polymer Degradation and Stability*, 59(1-3), 145–152.
- [29] **Yavuz, İ.** (2010). Metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(1), 49-58.
- [30] **Harafat, S., Ghoniem, N., Ying, A., Sawan, M., Williams, B., & Babcock, J.** (2004), Ceramic Foams: Inspiring new solid breeder materials, 12. *International*

Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interactions, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, September 16-17.

- [31] **Fleck, N., A., Deshpande, V., S., & Ashby, M. F.** (2010). Micro-architected materials: past, present and future, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2121), 2495–2516.
- [32] **Wadley, H., N.** (2006) Multifunctional periodic cellular metals, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31-68.
- [33] **Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R., K.** (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing*, 19, 167–183.
- [34] **Ashby, M.** (2006). The properties of foams and lattices, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30.
- [35] **Ozan, S., & Kati N.** (2011). Metal Köpükler, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May.
- [36] **Deshpande, V., Ashby, M., & Fleck, N.** (2001). Foam topology: bending versus stretching dominated architectures, *Acta Materialia*, 49(6): 1035-1040.
- [37] **Dias, E., B., L.** (2017). *The Effect of Manufacturing Defects on Compressive Strength of Polymeric Lattices Fabricated via Fused Deposition Modeling*, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 10288890)
- [38] **Neff, C.** (2015). *Mechanical Properties of Laser-Sintered-Nylon Diamond Lattices*, (Yüksek lisans tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 1603453)
- [39] **Yetgin, S. H., & Ünal, H.** (2008). Polimer esaslı köpük malzemeler, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17, 117-128.
- [40] **Erjavec, M., F.** (2011). Mechanical properties of cellular materials, *University of Ljubljana, Faculty of Mathematic and Physics*.
- [41] **Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., Gibson, L. J.** (2000). Metal foams: a design guide. *Elsevier*.
- [42] **Warriach M., S.** (2015). *Face Sheet/Core Debonding in Sandwich Composites Under Static and Fatigue Loading*, (Doktora tezi). ProQuest tezler veritabanı (UMI No. 3736225)
- [43] **Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. F., & Wadley, H. N. G.** (2001). The topological design of multifunctional cellular metals, *Progress in Materials Science*, 46(3-4), 309-327.
- [44] **Hirose, Y., Hojo, M., Fujiyoshi, A., & Matsubara, G.** (2007). Suppression of interfacial crack for foam core sandwich panel with crack arrester, *Advanced Composite Materials*, 16(1), 11-30.
- [45] **Strength of Sandwich Structures.** Erişim: 13 Nisan 2019, <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/sandwich/sp2.html>.
- [46] **Wong, K. V., & Hernandez, A.** (2012). *A Review of Additive Manufacturing*. *ISRN Mechanical Engineering*, 1–10. doi:10.5402/2012/208760

- [47] **Rodríguez, J. F., Thomas, J.P., & Renaud, J., E.** (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling, *Rapid Prototyp*, 9, 219–230.
- [48] **Ziemian, C., W., Cipoletti, D., E., & Ziemian, S., N.** (2014). Monotonic and Cyclic Tensile Properties of ABS Components Fabricated by Additive Manufacturing, *In: Proceedings of 25th International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 525–541.
- [49] **Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S.** (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers, *Polymer Test*, 60, 94–101.
- [50] **Smith, W., C., & Dean, R., W.** (2013). Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material, *Polymer Testing*, 32(8), 1306–1312.
- [51] **Weller, C., Kleer, R., & Piller, F., T.** (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, *Int. J. Production Economics*, 164, 43–56.
- [52] **Huang, S., H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L.** (2012). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191–1203.
- [53] **Kruth, J., P.** (1991). Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques, *CIRP annals*, 40(2), 603-614..
- [54] **Williams, C., B., Mistree, F., & Rosen, D.,W.** (2011). A functional classification framework for the conceptual design of additive manufacturing technologies, *Journal of Mechanical Design*, 133(12), 121002.
- [55] **Standard, A. S. T. M.** (2012). *F2792. 2012. standard terminology for additive manufacturing technologies*, ASTM F2792-10e1.
- [56] **Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., & Zavattieri, P. D.** (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- [57] **Scott_Crump**. Erişim: 25 Nisan 2019, https://en.wikipedia.org/wiki/S._Scott_Crump
- [58] **Kumar, G., P., & Regalla, S., P.** (2012). Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM), *In Applied Mechanics and Materials*, 110, 2245-2251. Trans Tech Publications.
- [59] **Thrimurthulu, K., P., P., M., Pandey, P., M., & Reddy, N., V.** (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585-594.
- [60] **Fused Deposition modeling FDM**. Erişim: 25 Nisan 2019, <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>
- [61] **Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T.** (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in construction*, 21, 262-268.
- [62] **Gruber, P. R., Drumright, R. E., & Henton, D. E.** (2000). Polylactic acid technology, *Adv. Mater*, 12, 1841-1846.

- [63] **Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E.** (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 219-230.
- [64] **Hart, K. R., Dunn, R. M., Sietins, J. M., Mock, C. M. H., Mackay, M. E., & Wetzel, E. D.** (2018). Increased fracture toughness of additively manufactured amorphous thermoplastics via thermal annealing, *Polymer*, 144, 192-204.
- [65] **Torres J., Cole M., Owji A., & et al.** (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments, *Rapid Prototyp J*, 22, 387–404.
- [66] **Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., & Marinescu, R.** (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review, *Polymer Testing*, 69, 157–166.
- [67] **Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M.** (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*, 58, 242-246.
- [68] **Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., & Martorelli, M.** (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604-617.
- [69] **Onwubolu, G. C., & Rayegani, F.** (2014). Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process, *International Journal of Manufacturing Engineering*.
- [70] **Alvarez, C., Kenny, L., Lagos, C., Rodrigo, F., & Aizpun, M.** (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts, *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110-116.
- [71] **Hernandez, R., Slaughter, D., Whaley, D., Tate, J., & Asiabanpour, B.** (2016). Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling, *In 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX (939-950).
- [72] **Torres, J., Cole, M., Owji, A., DeMastry, Z., & Gordon, A. P.** (2016). An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments, *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 387-404.
- [73] **Mahmood, S., Qureshi, A. J., Goh, K. L., & Talamona, D.** (2017). Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results, *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 122-128.
- [74] **Raney, K., Lani, E., & Kalla, D. K.** (2017). Experimental characterization of the tensile strength of ABS parts manufactured by fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7956-7961.
- [75] **Cantrell, J.** (2016). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D printed ABS and polycarbonate parts, *Adv. Opt. Met. Exp. Mech.*, 3, 89–105.
- [76] **Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J.** (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling:

Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, 124, 143-157.

- [77] Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., Hermenean, K. (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability, *Materials & Design*, 160, 179-193.
- [78] Ingrole, A., Hao, A., & Liang, R. (2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Materials & Design*, 117, 72–83.
- [79] Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J. A., Fay, S. D., Goodall, R., & Askes, H. (2016). Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments, *International Journal of Impact Engineering*, 89, 49–61.
- [80] Ullah, I., Brandt, M., & Feih, S. (2016). Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures, *Materials & Design*, 92, 937–948.
- [81] Mohsenizadeh, M., Gasbarri, F., Munther, M., Beheshti, A., & Davami, K. (2018). Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption, *Materials & Design*, 139, 521–530.
- [82] Choy, S. Y., Sun, C.-N., Leong, K. F., & Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting, *Materials & Design*, 131, 112–120.
- [83] Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R. K. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials, *Additive Manufacturing*, 19, 167–183.
- [84] Habib, F. N., Iovenitti, P., Masood, S. H., & Nikzad, M. (2018). Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology, *Materials & Design*, 155, 86–98.
- [85] Gümrük, R. (2012). *Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının incelenmesi.* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [86] Liao, G., Li, Z., Cheng, Y., Xu, D., Zhu, D., Jiang, S., & Zhu, Y. (2018). Properties of oriented carbon fiber/polyamide 12 composite parts fabricated by fused deposition modeling, *Materials & Design*, 139, 283–292.
- [87] Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering*, 80, 369–378.
- [88] Kaur, M., Yun, T. G., Han, S. M., Thomas, E. L., & Kim, W. S. (2017). 3D printed stretching-dominated micro-trusses, *Materials & Design*, 134, 272–280.
- [89] Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198–205.
- [90] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer

composites via additive manufacturing, *Composites Science and Technology*, 105, 144–150.

- [91] **Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C.-W., & Wang, L.** (2018). 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations, *Materials & Design*, 137, 226–234.
- [92] **Gautam, R., Idapalapati, S., & Feih, S.** (2018). Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling, *Materials & Design*, 137, 266-275.
- [93] **Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., & Ponnusamy, P.** (2018). Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM, *Materials & Design*, 144, 32–44.
- [94] **Solmaz, M. Y. & Çelik, E.** (2018). 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 277-286.
- [95] **Li, T., & Wang, L.** (2017). Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, *Composite Structures*, 175, 46–57.
- [96] **ASTM International.** (2015). ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International.
- [97] **ASTM International.** (2011). Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. ASTM C365/C365M-11a.
- [98] **Vakum İnfüzyon Yöntemi Anlatımı.** Erişim: 8 Mayıs 2019, <http://makinatek.com.tr/uncategorized/167-vakum-infuzyon-ve-vakum-paketleme-yontemleri-ile-uretilen-kompozit-plakaların-teknik-ozelliklerinin-karsilastirilmali-olarak-incelemesi/>
- [99] **Balıkoğlu, F., Ataş, A., & Arslan, N.** (2012). Yat ve Tekne İmalatında Vakum İnfüzyon (Vartm) ile Kompozit Üretim Yönteminin Uygulanması, 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 480-495. Balıkesir, 29-30 Kasım 2012.
- [100] **Vakum İnfüzyon Yöntemi.** Erişim: 9 Mayıs 2019, http://www.kompozit.boun.edu.tr/includes/Journal/VACUUM_INFUSION_METHOD.pdf
- [101] **Çekme Deney Föyü.** Erişim: 10 Mayıs 2019, http://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/MekanikDeneyFoyu_1.pdf
- [102] **Kompozit ve Seramik Malzemeler İçin Üç Nokta Eğme Deney Föyü.** Erişim: 10 Mayıs 2019, <http://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/Kompozit%20ve%20Seramik%20Malzemeler%20Icin%203%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu%281%29.pdf>
- [103] **Eğme Deneyi.** Erişim: 10 Mayıs 2019, http://malzememuh.cbu.edu.tr/db_images/site_117/file/egme.pdf
- [104] **ASTM International.** (2006). Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure. ASTM C393/C393M-06.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Necati ERCAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.11.1991 Konya/Meram
E-posta : necati.ercan@btu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 - ... Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Araştırma Görevlisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- “Eriyik Yığılma Modelleme İle Üretilen Hücresel Sandviç Panellerin Basma Özelliklerinin İncelenmesi” 4 th International Congress on 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry (3D-PTC2019), 2019, Antalya/Türkiye, Tam Metin Bildiri Sözlü Sunum
- “3B Eklemeli Üretilmiş Farklı Hücresel Yapılı Sandviç Panellerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Eğilme Davranışının İncelenmesi” 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, 2018, Samsun/Türkiye, Tam Metin Bildiri Sözlü Sunum