

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Kutay ÇAVA tarafından hazırlanan

FDM TİPİ 3 BOYUTLU YAZICI İLE TERMOPLASTİK PETEK/ÖKSETİK ÇEKİRDEK
MALZEME TASARIMI, ÜRETİMİ VE SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE KULLANIM
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 / 2019 gün ve 1805 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr Ümit ALVER

Üye : Doç. Dr Fatih YILDIZ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ASLAN

Jüri:
Prof. Dr. Ümit Alver
Doç. Dr. Fatih Yıldız
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Aslan

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kompozit sandviç malzemeler ağırlıklarına oranla yüksek kayma ve eğilme mukavemetine sahiptirler, bu sebep ile otomotiv, denizcilik ve havacılık endüstri alanlarında yapı malzemesi olarak sıkça kullanılmaktadır. Kompozit sandviç malzemeler çok çeşitli yüzey plakaları ve çekirdek malzemeleri kullanılarak üretilmektedir. Sandviç kompozit malzemelerde kullanılan çekirdek malzemeleri çok çeşitli malzeme, desen ve geometride üretilmekte ve bu çeşitlilik sandviç kompozitlerin mekanik karakteristikleri etkilemektedir. Bu yüzden bu çalışmanın odak noktası 3 boyutlu yazıcı kullanılarak farklı malzeme ve geometride hücresel ve öksetik tasarıma sahip çekirdek malzemelerin üretilmesi ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesidir.

Yüksek lisans çalışmam süresince değerli fikirleri, bilgi ve deneyimleri, teşvikleri ve fedakarlığıyla yol gösteren danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ASLAN' a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez çalışmama destek veren başta değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ASLAN olmak üzere, araştırma görevlileri Onur GÜLER ve A.Hasan KARABACAK' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bütün çalışmalarım boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Hatice Kübra YERLİ ve Hüseyin Can AKSA'ya teşekkür ederim. Son olarak hayatımın her anında maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan saygıdeğer aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma 217M905 kod no'lu TÜBİTAK 3001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Kutay ÇAVA

Trabzon 2019

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “FDM tipi 3 boyutlu yazıcı ile termoplastik petek/oksetik çekirdek malzeme tasarımı, üretimi ve sandviç kompozitlerde kullanım özelliklerinin araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Aslan ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/06/2019

Kutay ÇAVA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Sandviç Kompozit Malzemeler	1
1.3. Kompozit Yüzey Malzemeleri	2
1.4. Çekirdek Malzemeler.....	4
1.4.1. Poisson Oranı	5
1.4.2.1. Negatif Poisson Oranına Sahip Malzemelerin Özellikleri.....	8
1.4.2.2. Öksetik Malzemelerin Sınıflandırılması	9
1.4.2.2.1. Doğal Öksetik Malzemeler.....	9
1.4.2.2.2. Yapay Öksetik Malzemeler	10
1.4.2.3. Hücresel Öksetik Malzemeler ve Yapılar	10
1.4.2.3.1. Re-entrant (Yeniden Girişli) Desenleri.....	11
1.4.2.3.2. Kiral (Chiral) Desenleri	13
1.5.1. Erimiş Birikim Modelleme (FDM) Tipi Yazıcılar	16
1.5.1.1. FDM Tipi Yazıcılarda Kullanılan Filamentler	17
1.5.1.1.1. ABS Filamenti.....	18
1.5.1.1.2. PLA Filamenti	19
1.5.1.1.3. PETG Filamenti.....	19
1.5.1.1.4. HIPS Filamenti	20
1.5.1.2. FDM Tipi Yazıcılarda Kullanılan Filamentlerin Termal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	22

1.6.	Literatür Özeti	23
1.6.1.	Üç Boyutlu Yazıca Kullanılan Polimerlerin Mekanik Özellikleri	23
1.6.2.	Çekirdek Malzemeler	24
1.6.3.	Sandviç Kompozit Malzemeler	25
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	25
2.1.	Tasarım.....	25
2.1.1.	Standart Deney Numunelerinin Tasarımı	25
2.1.2.	Çekirdek Malzeme Tasarımı	26
2.1.2.1.	Çekirdek Malzemenin Hücre Tasarımı	26
2.1.2.2.	Çekirdek Malzemenin Yapısal Tasarımı.....	27
2.1.3.	Sandviç Kompozit Malzemelerde Kullanılacak Olan Çekirdek Malzemelerinin Tasarlanması	29
2.2.	Üretim	33
2.2.1.	Standart Deney Numunelerinin Üretimi	33
2.2.2.	Çekirdek Malzeme Üretimi.....	35
2.2.3.	Kompozit Çekirdek Malzemelerin Üretilmesi	36
2.2.3.1.	Sandviç Kompozit Malzemelerde Kullanılacak Olan Çekirdek Malzemelerinin Üretilmesi.....	37
2.2.3.2.	Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılacak Olan Karbon Epoksi Prepreg Kompozit Malzemelerin Kesilmesi.....	38
2.2.3.3.	Çekirdek Malzemeler ile Yüzey Tabaklarının Yapıştırılarak Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretilmesi	39
2.3.1	Standart Deney Numunelerine Mekanik Testlerin uygulanması.....	40
2.3.2	Çekirdek Malzemelere Düzlem İçi ve Düzlem Dışı Uygulanan Basma Testi ..	42
2.3.3	Sandviç Kompozit Malzemelerin Mekanik Testleri.....	43
2.3.3.1	Sandviç Panel Dikine (Edgewise) Basma Testi	43
2.3.3.2	Sandviç Panel Enine (Flatwise) Basma Testi.....	44
2.3.3.3	Üç Nokta Eğilme Testi.....	45
3	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
3.1	Standart Deney Numunelerine Uygulanan Mekanik Testler	46
3.1.1	Darbe Testi	46
3.1.2	Çekme Testi.....	47
3.1.3	Basma Testi.....	49

3.1.4	3 Nokta Eğme Testi	51
3.2	Çekirdek Malzeme Testleri	53
3.2.1	Çekirdek Malzeme Yoğunluk Hesapları.....	53
3.2.2	Çekirdek Malzeme Basma Testleri.....	54
3.3	Sandviç Kompozit Malzeme Testleri	59
3.3.1	Basma Testleri.....	59
3.3.1.1	Düzlem Dışı Basma Testi.....	59
3.3.1.2	Düzlem İçi Basma Testi.....	60
3.3.2	Üç Nokta Eğme Testi.....	61
4.	SONUÇLAR	63
5.	KAYNAKLAR.....	64
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FDM TİPİ 3 BOYUTLU YAZICI İLE TERMOPLASTİK PETEK/ÖKSETİK ÇEKİRDEK
MALZEME TASARIMI, ÜRETİMİ VE SANDVIÇ KOMPOZİTLERDE KULLANIM
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kutay ÇAVA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Mustafa ASLAN
2019, 67 Sayfa

Bu çalışmada, 3 boyutlu yazıcılar ile üretilen farklı hammadde, desen ve geometride üretilen çekirdek malzemeler ve bu çekirdek malzemeler kullanılarak üretilen sandviç kompozit malzemelerin mekanik davranışları incelenmiştir. İlk olarak çekirdek malzeme üretiminde kullanılacak olan ABS, PLA, HIPS ve PETG hammaddelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi adına FDM tipi 3 boyutlu yazıcı kullanılarak standart test numuneleri üretilmiş ve çekme, basma, 3 nokta eğme ve darbe testleri yapılmıştır. Daha sonra farklı hammadde, desen ve geometrilerde çekirdek malzemeleri üretilmiş, düzlem içi ve düzlem dışı basma davranışları incelenmiştir. Son aşamada ise ABS filamentinden 3 boyutlu yazıcı ile üretilen bal peteği ve re-entrant desenlerinde 0.6 mm hücre duvar kalınlığında, 6 mm hücre duvar uzunluğunda çekirdek malzemeleri karbon epoksi prepreg yüzey tabakaları ile yapısal yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Bu sandviç malzemelere düzlem dışı, düzlem içi ve 3 nokta eğme testleri uygulanmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3 boyutlu yazıcı, Bal peteği, Çekirdek malzemeler, Mekanik özellikler, Öksetik, Sandviç kompozit malzemeler

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE USAGE CHARACTERISTICS OF FDM TYPE 3 DIMENSIONAL
PRINTER THERMOPLASTIC HONEYCOMB / AUXETIC CORE MATERIAL DESIGN,
PRODUCTION AND SANDWICH COMPOSITES

Kutay ÇAVA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ASLAN
2019, 67 Pages

In this study, the core materials produced in different raw materials, patterns and geometries produced by 3D printers and the mechanical behavior of the sandwich composite materials produced by these core materials were investigated. In order to investigate the mechanical properties of ABS, PLA, HIPS and PETG raw materials, which were to be used in the production of core materials, standard test samples were produced by using FDM type 3-D printer and tensile, compression, 3 point bending and impact tests were performed. Then, the core materials were produced in different raw materials, patterns and geometries, and the in-plane and out-of-plane pressures were examined. In the last step 6 mm cell wall length, 0.6 mm in cell wall thickness of honeycomb and re-entrant core materials produced by 3D printers from ABS filament and assembled carbon epoxy prepreg surface layer with using structural adhesives and sandwich composites were produced. These sandwich materials were subjected to out-of-plane, in-plane and 3-point bending tests and their mechanical properties were examined.

Key Words: 3D printer, Auxetic, Core materials, Honeycomb, Mechanical behavior, Sandwich composites

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Sandviç kompozit malzemelerin şematik gösterimi	1
Şekil 1.2. İzotropik Pozitif Poisson Oranlı malzemenin çekme kuvveti altındaki şekil değiştirmesi	6
Şekil 1.3. (a) Pozitif Poisson oranına sahip bir malzemenin deformasyonu (b) Negatif Poisson oranına sahip bir malzemenin deformasyonu	8
Şekil 1.4. Mikro ve makro seviyedeki öksetik malzeme ve yapılar	9
Şekil 1.5. Normal ve re-entrant yapıların gerilme sonucundaki değişimleri	10
Şekil 1.6. Milton-Ashby öksetik malzemelerin haritası. B, elastikiyet modülünü, G, kayma modülünü, ve ρ kütle yoğunluğunu temsil etmektedir	11
Şekil 1.7. Re-entrant yapılarda öksetik davranışın gösterimi	12
Şekil 1.8. Masters ve Evans'ın altıgen birim hücresi.....	12
Şekil 1.9. Çeşitli farklı dönme simetrisine sahip çeşitli yıldız şekilli sistemler: (a) Öksetik balpeteği; (b) 3'lü yıldız sistemi; (c) 4'lü yıldız sistemi; (d) 6'lü yıldız sistemi	13
Şekil 1.10. Birim hücresi vurgulanan kiral deseni.....	14
Şekil 1.11. Kiral yapıların daralması: (a) genişletilmiş üçgen eleman; (b) sıkıştırılmış üçgen eleman; (c) maksimum uzamada tek bir yapısal eleman; (d) maksimum daralmadaki yapısal elamanın şematik gösterimi	14
Şekil 2.1. Mekanik deneylerde kullanılan numunelerin teknik resimleri ; (a) basma deneyi numunesi tasarımı, (b) çekme deneyi numunesi tasarımı, (c) darbe deneyi numunesi tasarımı, (d) eğme deneyi numunesi tasarımı	25
Şekil 2.2 Bal peteği ve re-entrant hücre geometrisi	26
Şekil 2.3. Tasarlanan hücresel ve öksetik desenler	28
Şekil 2.4. Düzlem ve düzlem dışı olarak tasarlanmış balpeteği ve re-entrant çekirdek malzemeler	28
Şekil 2.5. Sandviç panel dikine (Edgewise) basma testi, sandviç panel enine (Flatwise) basma testi ve yüzeye dik doğrultuda çekme deneyi (Flatwise) testi için kullanılacak olan Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi.....	30
Şekil 2.6. Sandviç panel dikine (Edgewise) basma testi, sandviç panel enine (Flatwise) basma testi ve yüzeye dik doğrultuda çekme deneyi (Flatwise) testi için kullanılacak olan altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi	31
Şekil 2.7. Üç nokta eğilme testinde kullanılacak olan Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi	31

Şekil 2.8.	Üç nokta eğilme testinde kullanılacak olan altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi	32
Şekil 2.9.	Ağırlık düşürme testlerinde kullanılmak üzere üretilen üç farklı kalınlıktaki çekirdek malzeme numunelerinden 21 mm kalınlıktaki Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesinin teknik resmi	32
Şekil 2.10.	Ağırlık düşürme testlerinde kullanılmak üzere üretilen üç farklı kalınlıktaki çekirdek malzeme numunelerinden 21 mm kalınlıktaki altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesinin teknik resmi	33
Şekil 2.11.	Numunelerinin üretiminde kullanılan 3 boyutlu yazıcı	34
Şekil 2.12.	Numunelerinin üretim öncesi Cura programındaki düzenlenmesine ait ekran görüntüsü.....	34
Şekil 2.13.	Dilimleyici programı ara yüzü ve baskıya hazırlanan çekirdek malzemeleri ...	36
Şekil 2.14.	Bal peteği desenindeki çekirdek malzemenin 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretimi	38
Şekil 2.15.	Sandviç kompozit malzemelerde kullanılacak olan kompozit karbon yüzey tabaka malzemelerin elmas uçlu dairesel testere ile kesilmesi.....	39
Şekil 2.16.	Çekirdek malzemelerin ve kompozit yüzey tabakalarının yapısal yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi	39
Şekil 2.17.	Ağırlık düşürme testlerinde kullanılacak Sandviç kompozit test numuneleri ..	40
Şekil 2.20.	Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenli düzlem içi basma testi numuneleri.....	42
Şekil 2.21.	MTS universal test cihazı.....	43
Şekil 2.22.	Test numunelerinin basma testi öncesi çekilen fotoğraflar	44
Şekil 2.23.	Petek ve re-entrant desenli numunelerin test cihazında çekilen fotoğrafları	44
Şekil 2.24.	Bal peteği ve re-entrant desene sahip numunelerin eğilme testi sırasındaki görüntüsü.....	45
Şekil 3.1.	3 boyutlu yazıcı ile üretilen test numuneleri darbe dayanımı sonuçları	46
Şekil 3.2.	3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonucu sütun grafiği.....	47
Şekil 3.3.	3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonucu grafiği.....	48
Şekil 3.4.	3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu sütun grafiği.....	49
Şekil 3.5.	3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu grafiği.....	50
Şekil 3.6.	Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait eğme testi sonucu sütun grafiği.....	51
Şekil 3.7.	Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu grafiği.....	52

Şekil 3.8.	Farklı desenlere sahip ABS çekirdek malzemelerinin (hücresel(a), öksetik(b)) düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri	54
Şekil 3.9.	Farklı desenlere sahip ABS çekirdek malzemelerinin (hücresel (a), öksetik (b)) düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri	55
Şekil 3.10.	Farklı malzemelerin bal peteği (a) ve re-entrant (b) desenlerde düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri	56
Şekil 3.11.	Farklı malzemelerin bal peteği (a) ve re-entrant (b) desenlerde düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri	56
Şekil 3.12.	Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri.....	57
Şekil 3.13.	Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri	57
Şekil 3.14.	Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri.....	58
Şekil 3.15.	Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafiği.....	60
Şekil 3.16.	Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlerin düzlem içi basma gerilim/gerinim grafiği	61
Şekil 3.17.	Re-entrant ve bal peteği çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit malzemelerin basma testi sürecindeki deformasyonu.....	61
Şekil 3.18.	Sandviç kompozit eğme testi yük/sehim grafiği, test sırasında re-entrant ve bal peteği desene sahip numunelerde gözlemlenen deformasyonlar	63

TABLOLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. CFRP, karbon elyaf ve çelik malzemenin çekme dayanımı, elastik modülü ve yoğunluk karşılaştırması.....	4
Tablo 1.2. Bazı malzemelerin Poisson oranları	6
Tablo 1.3. ABS, HIPS, PETG ve PLA filamentlerinin termal özellikleri	22
Tablo 1.4. ABS, HIPS, PETG, ve PLA filamentlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması.....	22
Tablo 2.1. Farklı geometrik değerlerdeki bal peteği ve re-entrant desenlerinin bağlı yoğunluk değerleri	27
Tablo 2.2. Balpeteği ve Re-entrant hücre tasarım parametreleri	27
Tablo 2.3. Çekirdek Malzeme Tasarım Parametreleri.....	29
Tablo 2.4. Numune üretiminde kullanılan hammadde türüne göre baskı sıcaklıkları	35
Tablo 2.5. Numune üretiminde kullanılan baskı parametreleri	35
Tablo 2.6. Sandviç kompozit malzemelere uygulanacak test işlemleri ve kullanılacak çekirdek malzemeler	37
Tablo 3.1. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait darbe dayanımı testi sonuçları.....	47
Tablo 3.2. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonuçları	48
Tablo 3.3. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonuçları	50
Tablo 3.4. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait eğme testi sonuçları.....	52
Tablo 3.5. Çekirdek malzemelerin desen türlerine göre yoğunluk değerleri.....	53
Tablo 3.6. Farklı desen, geometri ve malzemelerde üretilen çekirdek malzemelerin ortalama düzlem içi basma gerilim değerleri ve standart sapma değerleri	59

SEMBOLLER DİZİNİ

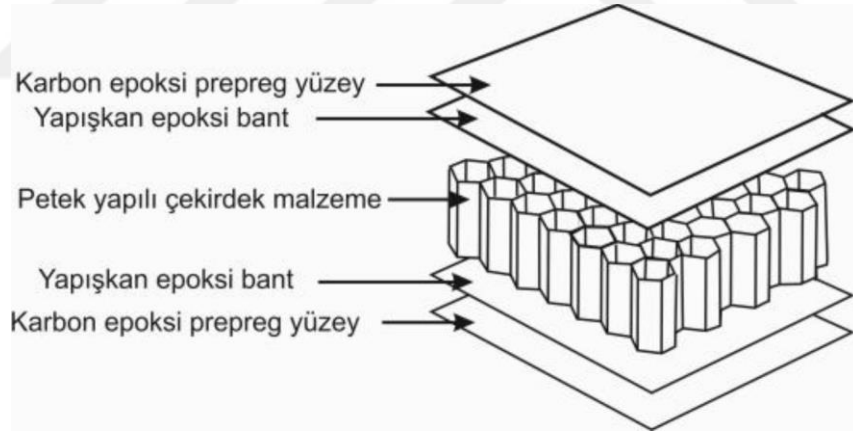
- FRP: Fiber Reinforced Plastic, Elyaf Katkılı Plastik
CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic, Karbon Elyaf Katkılı Plastik
MPa: Megapaskal
GPa: Gıapaskal
YBaCuO: İtriyum Baryum Bakır Oksit
UV: Ultraviyole
SLA: Stereolithography
DLP: Digital Light Processing,
FDM: Fused Deposition Modelling, Erimiş Birikim Modelleme
SLS: Selective Laser Sintering, Selektif Lazer Sinterleme
SLM: Selective Laser Melting, Selektif Lazer Erime
EBM: Electronic Beam Melting,
LOM: Laminated Object Manufacturing
BJ: Binder jetting
CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım
STL: Standart triangle language, Standart üçgen dili
PEEK: Poli Eter-Eter Keton
ABS: Akrilini Bütadiyen Stiren
PLA: Polilaktik asit
PC: Polikarbonat
PMMA: Polimetilmetakrilat
HIPS: High impact polystrene
PETG: Polietilentereftalat glikol
TPU: Termoplastik poliüretan
CPE: Klorlanmış polietilen
PVA: Polivinilakrilik
PA: Poliamit
mm: milimetre
N: Newton

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1.2. Sandviç Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit malzeme türüdür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerleri elde edilmesine olanak tanır. Isıya ve neme dayanıklı olmanın yanı sıra metal malzemelere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sandviç kompozit malzemeler de tabakalı kompozit malzemelerin farklı bir türüdür. Sandviç kompozit malzemeler, hafif ve nispeten kalın bir çekirdek ile ayrılan panelin üst ve alt tarafındaki iki ince fakat sert yüzey tabakasından oluşurlar (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Sandviç kompozit malzemelerin şematik gösterimi

Kullanılan çekirdek malzemesi ve yüzey tabaka malzemesine bağlı olarak birçok farklı sandviç kompozit malzeme türü üretilebilir. Sandviç kompozitlerde hemen hemen her malzemedен ve çok çeşitli geometrilere üretilen çekirdek malzemeleri kullanılabilmesinin yanı sıra en yaygın kullanılan çekirdek malzemeleri hücresel (petek) yapılar, polimerik köpükler veya periyodik kafes yapılarıdır. Sandviç kompozitlerde yaygın olarak kullanılan yüzey tabaka malzemeleri ise karbon elyaf kompozitler, cam elyaf kompozitler ve ince metal

filmlerdir. Çekirdek malzemesi, katı yüzey tabaka malzemeleriyle yüksek bir eğilme mukavemeti ve burulma direnci [1] ile birlikte yüksek kayma mukavemeti ve enerji emme kapasitesi olan sandviç paneller sağlayacak şekilde birleştirir. Bir sandviç malzemede, yüzey tabakaları düzlem içi ve eğilme yüklerinin çoğunu, hücresel çekirdek ise enine kayma yüklerinin çoğunu taşır[2].

Sandviç paneller, nispeten hafif olmaları ve yüksek atalet momentleri nedeniyle yüksek performanslı yapısal uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir [3]. Sandviç kompozit malzemeler günümüzde yüksek eğilme rijitlik-sertlik-ağırlık oranı, mükemmel ısı yalıtımı ve yüksek enerji emilimi özellikleri nedeniyle, havacılık, denizcilik, otomotiv, yel değirmenleri ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Sandviç panellerin malzeme ve tasarımının karmaşıklığı, çeşitli mühendislik uygulamaları için sandviç yapıların yapısal, aerodinamik ve ısı yalıtım / ısı değişim performansının geliştirilmesi talebine bağlı olarak artmaktadır. Son zamanlarda sandviç yapıların çok işlevlilik performansının, sandviç yapıların üretiminde hücresel çekirdeğin mikro tasarımı ile geliştirilebileceği gösterilmiştir [4]. İmalat teknolojilerindeki son gelişmeler, örneğin. eklemeli üretim (3D baskı) ve lazer kesimi, geleneksel imalat işlemleriyle imkansız olan hücresel çekirdeklerin üretilmesine izin vermeye başlamıştır [5]. Belirli desende çekirdeklere sahip sandviç yapıların üretimi için eklemeli imalat kullanılması, altıgen veya köpük çekirdekli geleneksel sandviç yapılara göre çeşitli avantajlara yol açar. Avantajları arasında, hücresel desene sahip çekirdeğin tasarımını ve geometrik özelliklerini kontrol edebilen geniş bir ölçekte parametrik çalışma imkanı gelmektedir [2]. Bununla birlikte, kompleks bir mikro tasarım sahip, eklemeli olarak imal edilmiş sandviç panellerin dayanıklılığı, farklı malzemeler için araştırılmaktadır [6].

1.3. Kompozit Yüzey Malzemeleri

Günümüzde sandviç kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç mühendislik uygulamalarında hafif ve yüksek verimlilikte malzeme arayışı birlikte artmaktadır. FBR (Fiber Reinforced Plastic), elyaf takviyeli plastik yüzey tabakalarından ve hafif, düşük yoğunluklu çekirdek malzemelerden yapılmış sandviç kompozitlerin, çeşitli yapısal uygulamalarda ağırlık azaltmada, mukavemet ve sertliğin arttırılmasında etkili olduğu gösterilmiştir. FRP yüzey tabakaları, eğilme nedeniyle gerilme ve basma gerilimlerine karşı

direnç gösterirken, çekirdek, kayma gerilmelerine karşı da direnç gösterir, yalıtım sağlar ve yüzey tabakaları arasındaki mesafeyi artırır ve atalet momentinin artmasına neden olur. Yüzey malzemesi olarak kullanılan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), karbon elyaf takviyeli plastik elyaf tipi güçlendirici yapıların bağlayıcı matris yapı içerisinde yönlendirilerek yerleştirilmesi ile üretilir. Cam elyaf ve karbon elyaf gibi çeşitli yüzey tabaka malzemelerinin [7], [8] yanı sıra keten gibi doğal elyaflar da yüzey tabaka malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır [9].

Karbon elyaf, son derece düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve yüksek sertlik ile karakterize edilen modern bir takviye malzemesidir. Malzeme kolayca şekillendirilebilir ve cam elyaf gibi kalıplanabilir. Karbon elyaf aynı zamanda takviye malzemesi olarak kullanılan elyafların en pahalısıdır. Bu gerçek genellikle kullanımını sınırlar. Karbon elyaflar, genellikle yaklaşık 8 um çapında küçük grafit kristalitlerinden oluşurlar.

Karbon elyaf takviyeli plastikler, metaller ve gelişmiş malzemelere kıyasla üstün mukavemet ve sertliğe sahip hafif malzemelerdir. Ancak, CFRP yüksek üretim maliyeti nedeniyle çoğunlukla uçaklar ve spor malzemeleri gibi ileri teknoloji ürünlerine uygulanmıştır. Düşük fiyatlı karbon elyaf üretimine odaklanan araştırma ve geliştirme çabalarındaki sürekli artış sonucunda, günümüzde CFRP malzemesinden otomotiv parçaları seri üretime geçmiş durumdadır. Genel olarak CFRP üretiminde dört farklı yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır bunlar, enjeksiyon kalıplama [10], reçine transfer kalıplama [11], karbon levha kalıp bileşiği [12] ve prepreg sıkıştırma kalıplama [13].

Karbon elyaf prepreg / bal peteği sandviç kompozitleri son birkaç on yılda uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaf ve bal peteğinden üretilen sandviç kompozitler, ağırlık / yüksek mukavemet ve ağırlık / sertlik ile karakterize edilir[14]. Genellikle yüzey malzemeleri benzer ve eşit kalınlıktadır. Ayrıca Tablo 1.1' de gösterildiği gibi karbon elyaf ve hacimce %58 oranda elyaf içeren karbon elyaf takviyeli polimer kompozitin mekanik özellikleri çelik ile kıyaslandığında CFRP daha üstün ve ağırlık bakımından daha avantajlıdır.

Tablo 1.1. CFRP, karbon elyaf ve çelik malzemenin çekme dayanımı, elastik modülü ve yoğunluk karşılaştırması [15], [16]

Malzeme	Çekme Dayanımı	Elastik modülü	Yoğunluk
CFRP ($V_f=0.58$)	1596 (MPa)	200 (GPa)	1.54 g/cm ³
Karbon Elyaf	3.53 (GPa)	230 (GPa)	1.76 g/cm ³
Çelik	0.50 (GPa)	210 (GPa)	7.8 g/cm ³

Bu tez çalışmasında kompozit yüzey tabakası olarak CFRP kullanılmıştır.

1.4. Çekirdek Malzemeler

Kompozit sandviç yapıların diğer ana bileşeni çekirdek malzemedir. Sandviç kompozit malzemelerin çeşitliliği temel olarak çekirdeğin konfigürasyonuna bağlıdır [17]. Sandviç yapısının etkinliğini korumak için çekirdek, panele uygulanan sıkıştırma veya ezme yüküne dayanacak kadar sağlam olmalıdır. Çekirdek ayrıca ilgili kesme kuvvetlerine karşı da direnmelidir. Çekirdek çökerse, mekanik sertlik avantajı kaybolur. Çekirdek yoğunlukları 16 kg/m³ ila 900 kg/m³ arasında değişmektedir. Çekirdek malzemeler genellikle dört çeşide ayrılır. Bunlar köpük veya katı çekirdek, bal peteği çekirdek malzemesi, ağ çekirdek malzemesi ve oluklu veya kafes yapıları çekirdek malzemesidir.

Köpük veya katı çekirdekler nispeten pahalıdır ve çok çeşitli yoğunluk ve kayma modülleri içeren neredeyse sonsuz bir köpük/plastik malzeme seçiminden oluşabilir. Petek-çekirdekli sandviç malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan hücre desenleri altıgen ve karedir. Ağ tipi çekirdek malzemeleri bir araya getirilmiş I tipi-kirişe benzer şekilde kullanılır. Kafes çekirdek ve demet çekirdek malzemelerinde ise çekirdekteki boşluk sıvı depolama veya ısı yalıtımı için kullanılabilir.

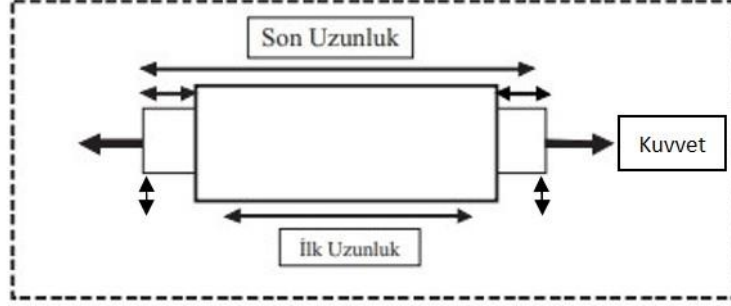
Köpük çekirdek malzemelerinin çeşitli tipleri vardır, bunlardan piyasadaki en çok kullanılan çekirdek malzemelerinden biri olan vinil köpüğü hidrokarbonlara, deniz suyuna, benzine ve dizel yağlara dirençli, sert, kapalı hücreli yapısına sahip bir malzemedir. Uçak ve otomotiv yapılarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır, ancak yüksek mekanik özelliklere ve kolay kullanıma ihtiyaç duyulan her yerde uygulanabilir. Vinil köpüğe hafif bir basma

uygularken fırında veya ısı tabancası kullanılarak şekillendirilebilir. Bir başka köpük tipi, yüksek yalıtım ve yüzme özelliklerine bir sert, kapalı hücre yapısına sahip çekirdek malzemesi olan poliüretan köpüktür. Bu çekirdek, denizcilik endüstrisinde onlarca yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır ve daha düşük özellikli bir dolgu malzemesinin gerekli olduğu durumlarda ekonomik açıdan avantajlıdır ayrıca hem polyester hem de epoksi reçine malzemeleriyle uyumludur.

Petek çekirdek malzemesi, bir bal peteğinin enine kesit dilimine benzer görünüşte paneller oluşturmak için bir araya getirilmiş bir dizi altıgen hücreden oluşan çekirdek malzemesi türüdür. Petek çekirdek malzemesinin tutuşma direnci yüksektir, esnek, hafif ve yüksek darbe direncine sahiptir. Çekirdek malzemelerinin en iyi ağırlık/mukavemet oranını sunar. Petek, öncelikle havacılık endüstrisinde yapısal uygulamalar için kullanılır. Bal peteği yapıları, düşük yük uygulamaları için düşük mukavemet ve sertlik, yüksek performanslı uygulamalarda yüksek mukavemet ve sertliğe kadar, istenen uygulamaya ve istenen özelliklere bağlı olarak, muhtelif farklı malzemeler kullanılarak imal edilir. Lamine veya sandviç panellerin mukavemeti, panelin kalınlığına, kullanılan yüzey malzemesine ve içindeki hücrelerin sayısına veya yoğunluğuna bağlıdır [18].

1.4.1. Poisson Oranı

Fransız bilim adamı Simeon Denis Poisson tarafından ortaya atılan ve kendi adını taşıyan Poisson oranı günümüzde çoğu mühendislik alanında malzemenin yapısını belirlemeye yarayan önemli özelliklerden biridir. Birçok farklı tanımlamanın yapıldığı Poisson oranı kısaca, bir malzemede kuvvet uygulanan yöndeki kısalma miktarı ile diğer yöndeki uzama miktarı arasındaki bağıntıdır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. İzotropik Pozitif Poisson Oranlı malzemenin çekme kuvveti altındaki şekil değişimi [19]

Diğer bir deyişle cisimlerdeki enine kılalmanın boyuna uzamaya oranıdır. Bu oran pozitif ve negatif olabilir. Çoğu malzeme pozitif Poisson oranına sahipken yakın geçmişte bazı negatif Poisson oranına sahip doğal ve yapay malzemeler bulunmuştur. Poisson oranı, elastik eşyönlü (izotropik) malzemeler için teorik olarak -1 ile 0.5 arasında değişmektedir. Lastik ve kauçuk gibi elastik malzemelerde oran pozitif yönde artarken daha katı malzemelerde sifıra yakındır [19]. Bazı malzemelerin Poisson oranları Tablo 1.2 'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Bazı malzemelerin Poisson oranları [19], [20]

Malzeme	Poisson Oranı
Alüminyum	0,33
Bakır	0,36
Beton	0,1-0,2
Buz	0,33
Çelik	0,3
Dökme Demir	0,22-0,30
Epoksi Reçine	0,38-0,40
Kauçuk	0,48-0,5
Polisitren	0,34
Polivinilklorür	0,35

Naylon	0,40
Teflon	0,39
Kurşun	0,43

Poisson oranı genel olarak Yunan nü (ν) sembolüyle belirtilir ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır:

$$\nu = \frac{-\epsilon_f}{\epsilon_b} \quad (1.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.2)$$

1 ve 2 numaralı eşitliklerde;

ν = Poisson Oranı

ϵ_f = Enine Uzama Oranı

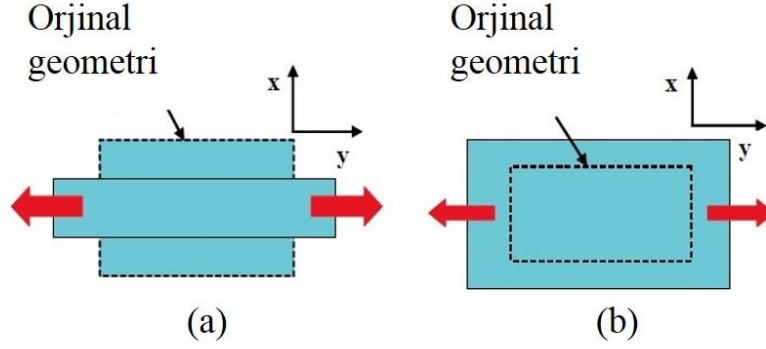
ϵ_b = Boyuna Uzama Oranı

ΔL = Uzunluk Değişimi

L = İlk Uzunluk

1.4.2. Negatif Poisson Oranı (Öksetik Malzemeler)

Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğu pozitif Poisson oranına sahip olmakla birlikte sınırlı sayıdaki malzeme negatif Poisson oranına sahiptir. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler öksetik (Auxetic) malzemeler olarak da adlandırılmaktadır. Öksetik terimi Yunanca kökenli olup auxetikos'tan gelmektedir ve kelime anlamı “genişlemeye eğilimli” dir. Öksetik malzemelerin kesitleri bası gerilimi altında daralma gösterirken çeki gerilimi sonucunda genişleme göstermektedirler (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. (a) Pozitif Poisson oranına sahip bir malzemenin deformasyonu (b) Negatif Poisson oranına sahip bir malzemenin deformasyonu

Bu özellik geçen yüzyıldan beri bilinmesine rağmen mekanik ve mantık olarak anlaşılması ve malzemelere uygulanması 1980li yıllarda başlanmıştır. İlk olarak Profesör Ken Evans tarafından 1991 yılında kullanılmıştır. Sonraki yıllarda kompozit yapılarda, lif, iplik, kumaş ve film üretiminde denemeler yapılmıştır [19].

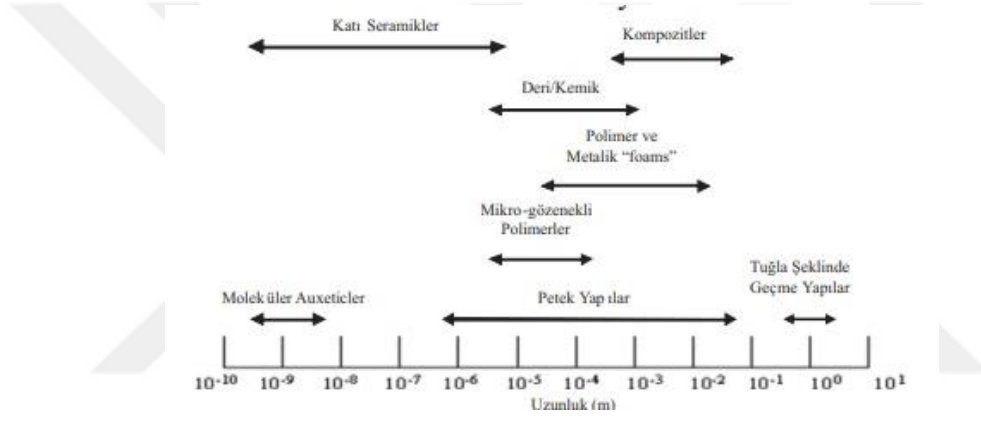
1.4.2.1. Negatif Poisson Oranına Sahip Malzemelerin Özellikleri

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelerle kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Bu avantajların başında daha iyi sürtünme davranışları gelmektedir. Diğer bir avantajlı özelliği ise kopma dayanımının pozitif Poisson oranına sahip malzemelerden daha yüksek olmasıdır [21]. Poisson oranı ile doğrudan ilişkili özellikler aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilir

- Yüksek sürtünme dayanımı
- Akustik davranış
- Yüksek darbe emilimi
- Yüksek tutunma (ara yüzey/matris) dayanımı
- Isıl darbe dayanımı
- Daha iyi kayma modülü [22]

1.4.2.2 Öksetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Öksetik malzemeler genel olarak doğal ve yapay olarak iki sınıfa ayrılır. Şekil 1.4' te büyüklüklerine göre öksetik malzemelerin sınıflandırılması gösterilmektedir. Sıvı kristal yapılar mikro (moleküler seviye) boyuttaki öksetik malzemelerdir. Petek yapılar makro (yapı seviyesi) boyuttaki malzemelerdir.



Şekil 1.4. Mikro ve makro seviyedeki öksetik malzeme ve yapılar [23].

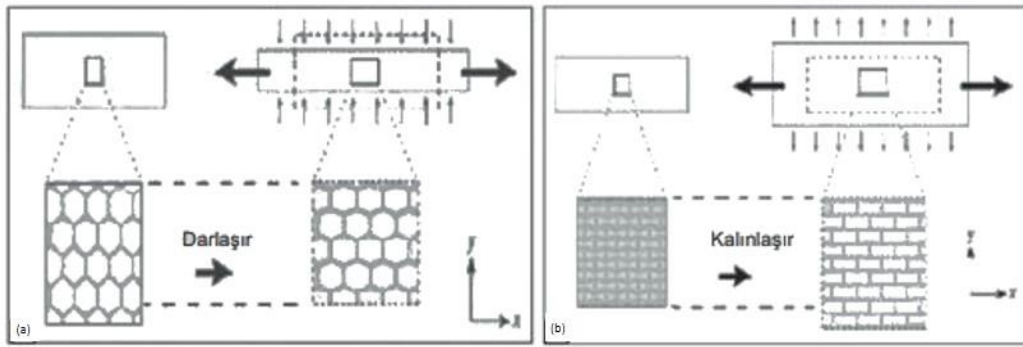
1.4.2.2.1. Doğal Öksetik Malzemeler

Demir sülfid, moleküler seviyedeki ilk öksetik doğal malzemedir ve 1900' lu yıllarda bulunmuştur [24]. Daha sonra Ledbetter tarafından YBaCuO' (İtriyum Baryum Bakır Oksit) in öksetik özelliğe sahip olduğu tespit edilmiştir [25]. Öksetik davranış moleküler seviyedeki doğal tek kristal yapılarda da gözlemlenmiştir.

Öksetik davranış tetrahedral hücreler içeren α -cristobalite ve bazı malzemeler için modellenmiştir. α -cristobalite ve α -quartz için pozitif ve negatif Poisson oranları analitik modellerle bulunmaktadır. Bazı hayvanların derilerinde (kedi), inek memesinin yüzeyinde, semender derisi ve insan kemiğinin süngerimsi dokusu gibi bazı biyomalzemelerde negatif Poisson oranı özellik bulunmuştur [26], [27].

1.4.2.2. Yapay Öksetik Malzemeler

Yapay öksetik malzemeler Roderic Lake'in 1987'de poliüretan köpüklerin sıcaklık ve üç yönlü sıkıştırma sonucunda öksetik yapıya dönüştüğünü gösteren çalışması sonucunda tanınmaya başlamıştır ancak ilk hücreli öksetik yapı 1982'de 2 boyutlu silikon kauçuk petek (altıgen balpeteği) yapılarında tasarlanmıştır [28]. Daha sonra öksetik petek yapılar üzerine birçok (öksetik balteteği) başarılı çalışma yapılmıştır. Şekil 1.5 (a)'da normal, Şekil 1.5 (b)'de öksetik petek yapıların gerilme sonundaki değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Normal ve re-entrant yapıların gerilme sonundaki değişimleri

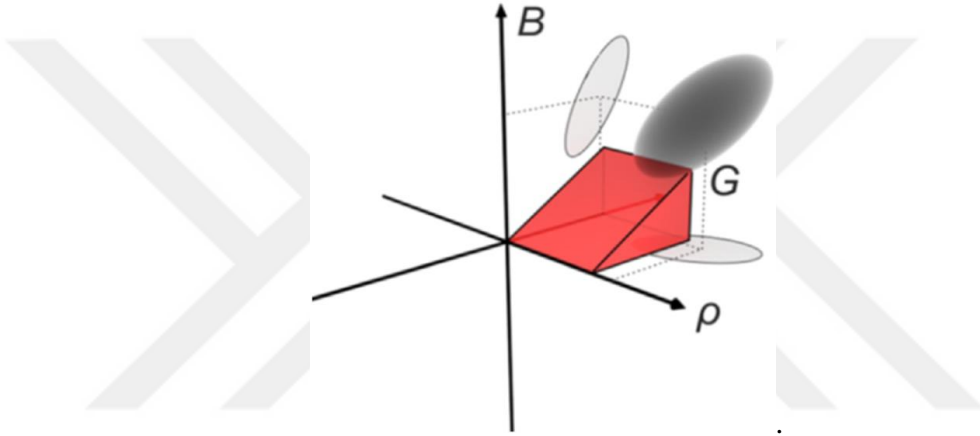
Yapay olarak oluşturulan önemli öksetik malzemelerden biri de kompozitlerdir. Lif takviyeli laminelerde öksetik özelliği oluşturulmuştur [29], [30]. Bu uygulamayla kompozitin darbe dayanımının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Öksetik petek yapılarla sandviç kompozitler tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tip kompozitler çift kavisli eğrilik özelliği göstermişlerdir. Araba ve uçak parça yapımında bu tip kompozitlere tasarım açısından kullanım avantajına sahiptirler.

1.4.2.3. Hücreli Öksetik Malzemeler ve Yapılar

Katı malzemelerle karşılaştırıldığında, hücreli malzemeler, düşük yoğunluklu, yüksek enerji emilimi, yüksek akustik izolasyon ve sönümlenme, filtreler vb. gibi sayısız üstün mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra, hücreli öksetik malzemeler ve yapılar çoğu geleneksel malzeme ve yapıyla

karşılaştırıldığında dik baskı yükleme yönü altında daralma davranışıyla genel kanının aksine bir davranış sergilemektedirler.

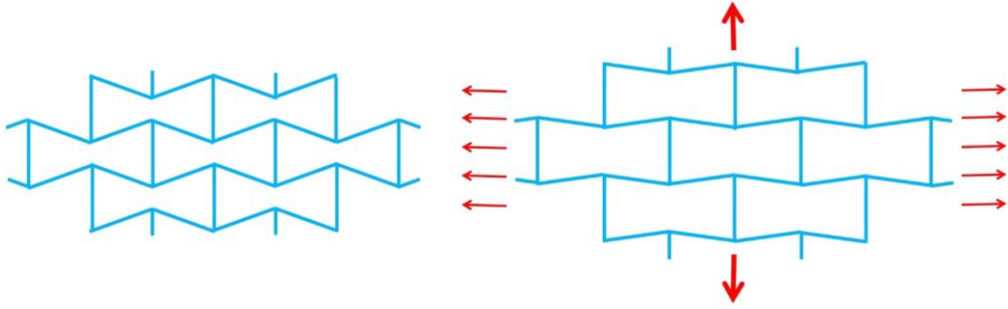
Öksetik malzemelerin Milton – Ashby haritası (elastikiyet modülü (B), kayma modülü (G) ve kütle yoğunluğu (ρ)), Şekil 1.6' da gösterildiği gibi sıradan katı ve öksetik malzemeler arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılabilir. Elipsler sıradan katı malzemelerin özellik alanını temsil ederken kırmızı alan ise hücresel öksetik malzemelerin özellik alanını gösterir [31].



Şekil 1.6. Milton-Ashby öksetik malzemelerin haritası. B , elastikiyet modülünü, G , kayma modülünü, ve ρ kütle yoğunluğunu temsil etmektedir [31].

1.4.2.3.1. Re-entrant (Yeniden Girişli) Desenleri

Gibson ve arkadaşları [28] ilk olarak 1982'de Re-entrant altıgen balpeteği şeklinde geleneksel hücresel yapıyı tanıttılar. 2 boyutlu Re-entrant altıgenler içeren balpeteği deseni Şekil 1.7' de gösterilmektedir. Re-entrant balpeteğine yatay yönde gerilim uygulandığında dikey yöndeki nervürler dışarı doğru hareket eder. Buna ek olarak öksetik davranış, Re-entrant altıgen bal peteği sistemi için nervürlerin bükülmesine de bağlanabilir [32].



Şekil 1.7. Re-entrant yapılarda öksetik davranışın gösterimi [33].

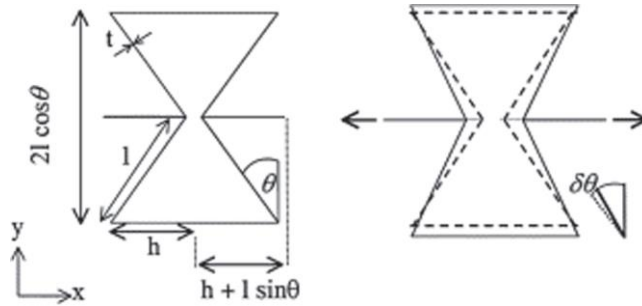
Poisson oranı ve Young modülünün katsayısı yükleme yönü boyunca aşağıdaki gibidir:

$$v_{12} = \frac{\sin\theta(h/(l+\sin\theta))}{\cos^2\theta} \quad (1.3)$$

$$E_1 = k \frac{(h/(l+\sin\theta))}{bcos^3\theta} \quad (1.4)$$

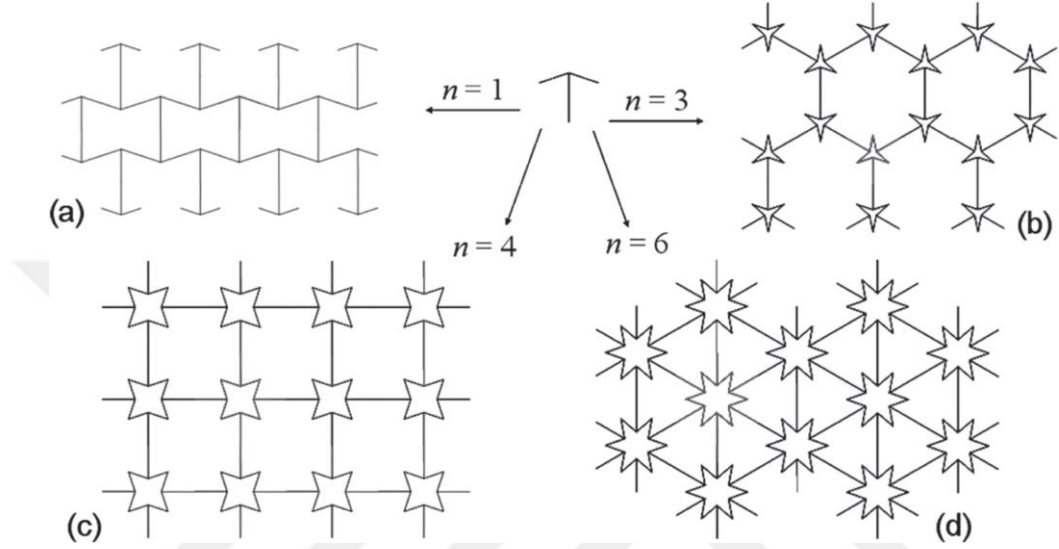
$$k = E_s b \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (1.5)$$

h , l , θ , Şekil 1.8' de tanımlandığı gibidir, E_s iç hücre duvarlarının Young modülüdür.



Şekil 1.8. Masters ve Evans'ın altıgen birim hücresi [34].

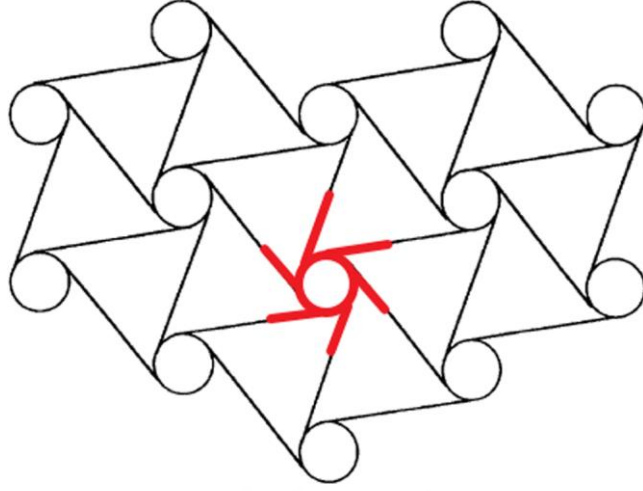
Yıldız desenine sahip modellerin re-entrant modellerin varyantları olduğu ve bu desenlerin negative poisson oranına sahip olduğu kabul edilebilir. Şekil 1.9' da 3, 4 ve 6 rasyonel simetriye sahip yıldız desenli yapıların bir örneği verilmiştir.



Şekil 1.9. Çeşitli farklı dönme simetrisine sahip çeşitli yıldız şekilli sistemler: (a) Öksetik balpeteği; (b) 3'lü yıldız sistemi; (c) 4'lü yıldız sistemi; (d) 6'lü yıldız sistemi [35].

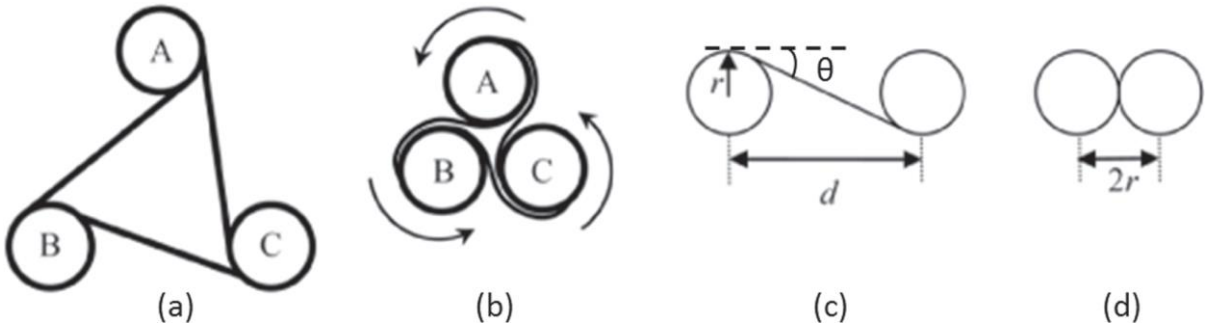
1.4.2.3.2. Kiral (Chiral) Desenleri

Kiral modeller, yaygın olarak araştırılan bir başka hücrel öksetik materyal türüdür ve aslında 'kiral' kelimesi ayna görüntüsü üzerinde üst üste gelmeyen bir molekül anlamına gelir. Aynı zamanda, bu terim genellikle iplikçiliğin fiziksel bir özelliğini sunmak için kullanılır. Temel kiral birimler, düz ligamentleri (nervürler), Şekil 1.10' da gösterildiği gibi merkezi düğümlere bağlamak suretiyle oluşturulur.



Şekil 1.10: Birim hücresi vurgulanan kiral deseni [36].

Şekil 1.11’ de kiral deseninin yük altında büzülmesi gösterilmiştir. Kiral desenine yük uygulandığı zaman tasarlanan geometri parametrelerine göre uzun kirişler merkez daire etrafına sarılır (Şekil 1.11(b)). Şekil 1.11 (c) ve (d), bağlantı kirişinin kalınlığı ihmal edilebilir olarak değerlendirildiğinde maksimum genişleme ve tamamen sıkıştırılmış durumu gösterir. Şekil 1.11’ de örnek gösterilen kiral deseni için doğrusal büzüşme oranı $d/2r$ veya $(l^2-4r^2)^{1/2}/2r$ denklemlerinden hesaplanabilir.



Şekil 1.11. Kiral yapıların daralması: (a) genişletilmiş üçgen eleman; (b) sıkıştırılmış üçgen eleman; (c) maksimum uzamada tek bir yapısal eleman; (d) maksimum daralmadaki yapısal elemanın şematik gösterimi [37].

1.5. 3 Boyutlu Yazıcılar

Kişisel bilgisayarın yaygınlaşması neticesinde, baskı kelimesi belgelerin (çoğunlukla dijital dosyalar biçiminde) kâğıt üzerine çoğaltılması işlemi için kullanılmaya başlamıştır. Üç Boyutlu (3D) baskı olarak adlandırılan eklemeli üretim (Additive Manufacturing) yöntemi ise, adını 1977'de bir nesne oluşturmak için birbirini takip eden malzeme katmanlarının eklendiği bir üretimden almaktadır. İlk üç boyutlu (3D) baskı teknolojisi, hızlı tasarım prototipleri' nin mühendislik ihtiyacını karşılamak için 1980'lerin başlarında ortaya çıktı. 1990'larda bu süreç, özellikle mimarlık ve üretim alanlarında geniş çapta gelişerek “hızlı prototipleme” ve “eklemeli üretim” olarak kendini gösterdi. Günümüzde birçok mühendislik ve tasarım ihtiyacını karşılayabilen, termoplastik ve polimerlerden metale kadar çok çeşitli malzemeleri kullanarak birçok farklı nesnelere üretebilen çok çeşitli 3D baskı teknolojileri bulunmaktadır.

3 boyutlu yazıcılarda kullanılan hammaddeler çok çeşitli türlerde olabilir bu hammaddelerden bazıları UV ışık altında kürlenerek sıvı reçineler, termoplastik polimerlerden üretilmiş filamentler, metal veya seramik tozlar olabilir. 3 Boyutlu yazıcılarda kullanılan hammadde, eksen sayısı, yazıcı şase yapısı ve hammadde eriticisi gibi birçok faktörlerden dolayı ortaya farklı 3 boyutlu yazıcı tipleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde 3 boyutlu yazıcıların Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP), Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Electronic Beam Melting (EBM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Binder Jetting (BJ) gibi birçok farklı üretim yöntemini kullanan tipi vardır. 3D yazıcıların çalışabilmeleri için 3 boyutlu modele, tasarıma ihtiyacı vardır. Bilgisayar ortamında AutoCAD, Solidworks, 3DsMax gibi bir CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programı ile tasarlanmış çizimler veya 3 boyutlu tarayıcı ile taranmış olan nesnelere STL (Standart Triangle Language) uzantısında dışarı aktarılırlar. 3D yazıcının baskı parametrelerinin kontrol edildiği dilimleyici programlar STL uzantısındaki dosyayı algılar ve düzenlenen baskı parametrelerine göre üretimi gerçekleştirir.

Günümüzde 3 boyutlu yazıcıların kullanım alanı hızla artmaktadır. Medikal alanda bile her hastaya ve klinik ihtiyaçlara göre uyarlanabilen özel tıbbi ekipmanlar yapılabilmesinden dolayı bu teknolojinin gelişmesine duyulan talep her geçen gün artmaktadır.

3D baskı yöntemiyle daha karmaşık ve yüksek teknoloji ürünü üretmeyi ümit eden tasarımcılar, sanatçılar ve girişimciler için gelecekteki talepleri karşılamak için, elektronik sensör gibi fonksiyonel aygıtların 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş makro ölçekli yapılara dahil edilmesi de önerilmektedir. 3 boyutlu baskı tekniğinin geniş bir uygulama alanına girebilmesi için, düşük maliyetli ve kolay erişilebilir malzemeler gerekmektedir.

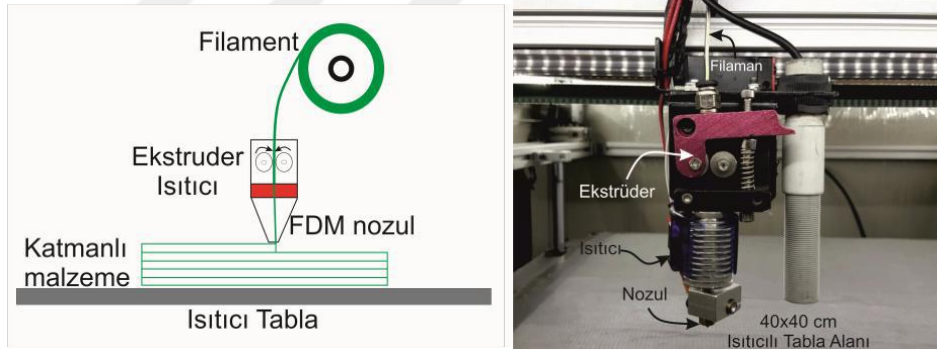
Erimiş Birikim Modelleme (Fused Deposition Modeling. FDM) tipi 3 boyutlu yazıcıların hızlı prototipleme, karmaşık tasarımları kolay bir şekilde üretme kabiliyeti, düşük hammadde ve cihaz maliyeti ve yüksek sayıda baskı parametresine açık kaynak kodlu programların kullanılmasına imkan sağlamasından dolayı en çok tercih edilen 3 boyutlu yazıcı tipleri arasındadır. Bunun yanında üretilecek parçanın baskı alanından büyük olmaması gerekmekte tersi bir durumda ise tasarımın parçalara bölünerek üretilmesi gerekmektedir. FDM tipi yazıcıların baskı sıcaklık sınırı genel olarak 290-300 °C arasındadır bunun yanı sıra bazı polimerler türlerinden baskı alınabilmesi için baskı ortam sıcaklığının oda sıcaklığından yüksek olması gerekmektedir. FDM tipi yazıcıların baskı alanı ve sıcaklık sınırlamaları neticesinde PEEK (Poli Eter-Eter-Keton) gibi üretimi için yüksek sıcaklık gereken hammaddeler ve büyük boyutlu tasarımlar kapalı baskı alanına (kabin) ihtiyaç duymaktadır.

1.5.1. Erimiş Birikim Modelleme (FDM) Tipi Yazıcılar

Günümüzde en çok kullanılan 3 boyutlu yazıcı tipi ve yöntemidir. Elastomerik polimerlerden ABS (Akrilonitril Butadien Stiren), PLA (Polilaktik-asit), PC (Polikarbonat), PEEK (Polieter-eter keton), PMMA (Polimetil metakrilat), HIPS (High impact polistiren), PETG (Polietilentereftalat glikol), TPU (Thermoplastic poliüretan), CPE (Chlorinated polyethylene) gibi mühendislik termoplastiklerine kadar geniş bir hammadde aralığından parça üretimine imkan vermektedir.

STL veya “.obj”(object) formatına dönüştürülen 3 boyutlu tasarım, kullanılacak olan 3 boyutlu yazıcı ile uyumlu, üretimi yapılacak modeli katmanlara ayırmaya ve baskı parametrelerinin düzenlenmesini sağlayan bir dilimleyici programa aktarılır.

Baskı işlemine başlamadan önce yazıcının ucunda ‘nozzle’ diye adlandırılan kafa bölgesinin belirli bir sıcaklığa gelmesi gerekmektedir; bu sıcaklık hammadde türüne göre değişkenlik göstermektedir. 3 Boyutlu yazıcıda üretilecek parçanın baskının gerçekleştiği tabla ile arasında iyi bir yapışma sağlanması için tabla sıcaklığı da hammadde türüne göre ayarlanır. FDM tipi 3 boyutlu yazıcılarda baskı işlemi, filamentin yazıcı tasarımına göre kafa bölgesinin üstünde veya yazıcının arka bölgesinde bulunan bir step motor tarafından yazıcının nozul bölgesine belli bir hızda sürülmesi ile başlar. Nozul bölgesinden eriyerek çıkan filament baskının gerçekleştiği tabla yüzeyinde yayılır yayılmaz soğuyarak katı formuna geçer, daha sonra gelen katmanlar ise birbirleri üzerinde katılarak modeli oluşturmaya başlar. Tüm katmanlar tamamlandıktan sonra model katı formda hazır hale gelir. FDM tipi bir 3 boyutlu yazıcının kafa bölgesine ait görsel ve çalışması prensibinin şematik gösterimi Şekil 1.12’ de verilmiştir.



Şekil 1.12. FDM tipi 3 boyutlu yazıcının kafa bölgesi ve çalışma prensibi

1.5.1.1. FDM Tipi Yazıcılarda Kullanılan Filamentler

FDM teknolojisinde üç boyutlu yazıcının çalışma prensibi oldukça basittir. Nozzle adı verilen uçta plastik eritilerek dökülür ve tıpkı bir bina inşa eder gibi obje katman katman oluşturulur. Eritilerek dökülen bu plastik malzeme filament olarak adlandırılır.

3D yazıcı filamentlerinin en çok tercih edilenleri ABS ve PLA’dır. Ayrıca PETG, HIPS, PVA, PA gibi filamentler de kullanılmaktadır. Bir diğer tür ise PLA polimeri ile ahşap talaşının karışımı olan ki bu oran genellikle %20-40 arasındadır ahşap filamentlerdir.

Bu tez çalışmasında ABS, HIPS, PETG, PLA filamentleri çekirdek malzeme üretiminde kullanılmıştır. Bu filamentlere ait temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.5.1.1.1. ABS Filamenti

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), mukavemeti yüksek ve petrol bazlı bir termoplastiktir. FDM teknolojisini kullanan ve ısıtıcı bir tablaya sahip (ABS hammadde kullanılarak üretilen parçanın baskı sırasında tablaya yapışmasını sağlamak için table sıcaklığının 80-90 °C olması gerekir) 3 boyutlu yazıcı ABS hammadresi ile baskı yapabilir.

ABS filamentinin temel özellikleri;

- Yüksek sertlik, dayanıklılık ve darbelere karşı direnç.
- Düşük esneklik.
- Aseton ile çözümlenebilir ve yüzey işlemesi yapılabilir.
- Yiyecek ve içecekler ile kullanılması önerilmez.
- Genellikle basım sıcaklığı 230°C – 250°C arasındadır.
- Soğuma esnasında kalkma ve çatlama sorunları ile karşılaşılması için kapalı sisteme sahip 3D yazıcı önerilir.
- Tabla sıcaklığı 80°C – 120°C arasında önerilmektedir.

ABS filamentinin kullanım alanları;

ABS, mukavemeti yüksek bir malzeme olduğu için işlevsel 3D modellerin dayanıklı ve sağlam olması için tercih edilebilmektedir. Mühendislik alanında prototip amaçlı 3D modeller, arabalar, elektrik ekipmanları gibi uygulamalarda kullanılır. Ancak ABS hammadresinden üretilen parçalar, sağlık açısından özellikle sıcak yiyecekler ve içecekler ile temas halinde olmamalıdır ve parçanın üretimi sırasında ortaya çıkan gaz (Hidrosiyanik Asit- HCN) mümkün olduğunca solunmamalıdır.

1.5.1.1.2. PLA Filamenti

PLA (Polylactic Acid), mısır nişastası ve şeker kamışından üretilen organik bir biyopolimer ve termoplastiktir. Bu nedenle, insan sağlığına zararlı değildir. ABS ile kıyaslandığında daha parlak bir görüntüye sahiptir. FDM teknolojisini kullanan bir 3D yazıcı PLA baskı yapabilir. 3D yazıcı dışında; bazı paketleme malzemeler, streç film, plastik kaplar ve plastik su şişelerinde de kullanılmaktadır.

PLA Filamentinin Temel Özellikleri;

- Sert, kullanıcı dostu, dayanıklı ve darbelere karşı dirençlidir.
- Hafif esnekliğe sahiptir, ancak kırılımandır.
- Kloroform ile çözünebilir ve yüzey işlemesi yapılabilir.
- Basım sıcaklığı genellikle 190°C – 220°C arasındadır.
- Soğuma esnasında kalkma ve çatlama sorunları ile karşılaşılmaz.
- Tabla sıcaklığı 50°C – 70°C arasında önerilmektedir.

PLA Filamentinin Kullanım Alanları;

PLA daha parlak bir görüntüye sahip olduğu için göze hitap eden alanlarda ve sağlığa zararlı olmadığı için insan ile temas halinde olabilecek yerlerde kullanılmaktadır. Örneğin; oyuncaklar, mimari ölçek modeller, mutfak gereçleri, kurabiye kalıpları, saklama kapları gibi. Bunun yanı sıra güneş ışığı ile sürekli maruz kalacak modeller için PLA kullanılmaması önerilmektedir. PLA' dan yapılmış ürünlerinin 60°C'den yüksek sıcaklıklarda yıkanmaması önerilmektedir.

1.5.1.1.3. PETG Filamenti

Polietilen tereftalat (PET), dünyada en yaygın kullanılan polimerlerden biridir. PET polimeri, su şişesinden giysilerde kullanılan ipliklere, yiyecek kaplarına birçok yerde

kullanılmaktadır. PET ayrıca termoform işlemlerinde de kullanılır ve mühendislik reçineleri oluşturmak için cam lifi ile birleştirilebilir. Temel olarak, binlerce tüketici ürünü, yiyecek ve içecek bu materyal içinde teslim edilir ve paketlenir.

3 boyutlu yazıcılarda ise, PET'in değiştirilmiş bir sürümü olan PETG hammaddesinden üretilen filamentler kullanılmaktadır. “G” harfi polimerizasyon sırasında malzeme bileşimine eklenen “glikol” anlamına gelir. PETG temel PET formundan daha saydam, daha az kırılğan ve kullanımı daha kolay olan bir filamenttir. Moleküler yapısı ise düzensizdir; 88 °C camsı geçiş sıcaklığına sahip saydam ve amorfur yapıdadır.

PETG filamentinin temel özellikleri;

- PETG filament, ABS (daha güçlü, sıcaklığa dayanıklı, daha dayanıklı) işlevselliğini ve PLA'nın (yazdırması kolay) güvenilirliğini tek bir malzemedeki birleştirmiştir.
- Katmanlar arası yapışması genellikle çok iyidir.
- Baskı sırasında çarpılma veya büzülme ihtimalini azdır.
- Baskı sıcaklığı 240-260 °C arasındadır.
- Tabla sıcaklığının 60-80 °C arasında olması önerilmektedir.

PETG Filamentinin kullanım alanları;

PETG Filamenti bir çok yönünden 3 boyutlu baskılar için iyi bir malzemedir ancak esnekliği, dayanıklılığı, sıcaklık ve darbe dayanımı nedeniyle diğer birçok filamentten daha üstün özellikler göstermektedir. Bu durum PETG filamentini, mekanik parçalar, 3D yazıcı parçaları ve koruyucu bileşenler gibi, sürekli veya ani gerilime maruz kalabilecek nesnelere için kullanımı ideal bir 3D yazıcı hammadesi yapmaktadır. Ek olarak, PETG filamentini yiyecek veya içecek ile karşılaşacak nesnelere için en ideal filamentlerden biridir.

1.5.1.1.4. HIPS Filamenti

Yüksek darbe dayanımlı polistiren veya HIPS(High Impact Polistren), polistiren ve kauçuğun karışımı bir malzeme karışımıdır. HIPS limonen çözültisinde çözüldüğü için,

genellikle destek malzemesi olarak kullanılır, aşındırıcılar, kesici aletler veya baskıyı bozan diğer şeyler yoluyla destek malzemesinin çıkarılması gereğini ortadan kaldırır.

Limonen, limon kabukları ile hazırlanan bir çözüldür ve kolayca elde edilir. Ancak diğer materyaller limonen tarafından zarar gördüğünden ABS hammaddesi kullanılan baskılarda destek malzemesi olarak kullanması önerilmez.

HIPS, ABS'ye çok benzemekle beraber ABS'den daha dayanıklıdır. Dolayısıyla, bir destek malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra, kendisi de eklemeli üretimde ana malzeme olarak kullanılmaktadır. HIPS kolayca boyanır, işlenebilir ve çok sayıda yapıştırıcı ile uyumludur. Ayrıca gıdalarla güvenle kullanılabilir, toksik değildir, tamamen geri dönüştürülebilir ve hidroskobik değildir, yani nemli ortamlarda bozulmayacağı anlamına gelir. HIPS'in ABS ile paylaştığı gaz salınım konusunda olumsuz bir yönü bulunmaktadır. Baskı sırasında, HIPS atmosfere az miktarda stiren salgılar. Bu nedenle, bu malzemeyi kullanırken yazıcının iyi havalandırılmış bir alanda bulunması gerekmektedir.

HIPS filamenti genellikle 220 ° C ila 240 ° C arasında bir nozül sıcaklığı ve 90 ° C ila 110 ° C arasında bir tabla sıcaklığı ile basılır. Bu, bazı 3 boyutlu yazıcıların tabla yapışmasıyla ilgili sorun yaşayacağı, yüksek tabla sıcaklıklarına ulaşması ve bakımının zor olduğu anlamına gelir.

HIPS Filamentinin Temel Özellikleri;

- Yüksek sertliğe sahiptir.
- Orta seviyede elastikiyete sahiptir.
- Baskı için yüksek tabla sıcaklığına ihtiyaç duyması haricinde kullanımı kolaydır.
- Baskı sıcaklığı 220 - 240 °C arasındadır.
- Tabla sıcaklığı 90 - 110 °C arasında olmalıdır.
- Büzülme veya çarpılma oranı düşüktür.
- Ortamdaki nemden etkilenmez.
- Limonin çözeltisinde çözülebilir.

1.5.1.2. FDM Tipi Yazıcılarda Kullanılan Filamentlerin (ABS, HIPS, PETG, PLA) Termal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

ABS, HIPS, PETG, PLA filamentlerine ait erime akış indeksi (MFI), camsı geçiş sıcaklığı, gevşeme sıcaklığı, erime sıcaklığı, baskı sıcaklığı ve yatak sıcaklığı gibi termal özellikler Tablo 1.3’ de verilmiştir. Tablo 1.3 incelendiğinde ABS, HIPS, PETG filamentlerinin erime, camsı geçiş, baskı ve tabla sıcaklıkları PLA filamentinden daha yüksektir. Bu her ne kadar baskı kolaylığı açısından PLA filamentini tercih sebebi yapsa da PLA filamentinden üretilen 3 boyutlu parçaların 60 °C’ den yüksek sıcaklıklarda kullanılmasına engel olmaktadır.

Tablo 1.3. ABS, HIPS, PETG ve PLA filamentlerinin termal özellikleri

Termal Özellikler	ABS	HIPS	PETG	PLA
Erime Akış İndeksi(MFI)	9.7 cm ³ /10 dk	6.8 cm ³ /10 dk	7 cm ³ /10 dk	10.3 cm ³ /10 dk
Camsı Geçiş Sıcaklığı	105°C	100°C	80°C	60-65°C
Gevşeme Sıcaklığı	110-125°C	120-130°C	125-130°C	70-80°C
Erime Sıcaklığı	210-240°C	200-210°C	220-230°C	160-190°C
Baskı Sıcaklığı	230-250°C	220-240°C	240-260°C	190-220°C
Tabla Sıcaklığı	80-120°C	90-110°C	60-80°C	50-70°C

ABS, HIPS, PETG ve PLA filamentleri mekanik özellikler açısından karşılaştırıldığında ise en yüksek çekme dayanımını (59 MPa) PLA filamentini en düşük çekme dayanımını (27MPa) ise HIPS filamentini göstermiştir. Bu dört filament incelendiğinde en düşük eğme dayanımını PETG filamentini göstermektedir (Tablo 1.4).

Tablo 1.4. ABS, HIPS, PETG, ve PLA filamentlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması

Mekanik Özellikler	ABS	HIPS	PETG	PLA
Çekme Dayanımı (MPa)	40.7	27	29	59
Kopma Uzaması (%)	6.8	4.25	2.6	4.85
Eğme Dayanımı (MPa)	13.8	10.9	8.2	19.1
Eğme Modülü (MPa)	635	430	264	955

1.6. Literatür Özeti

1.6.1. Üç Boyutlu Yazıcıda Kullanılan Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Anoop Kumar Sood ve arkadaşları [38], Katman kalınlığı, yönelim, tarama açısı, tarama genişliği ve hava boşluğu gibi önemli üretim parametrelerin, üretilen numunelerde gerilme, eğilme ve darbe dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Üretim parametreleri ile ilgili ampirik modeller geliştirilmiş ve modeller ANOVA kullanılarak test edilmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre zayıf mukavemetin temel nedenin tabakaların içindeki veya arasındaki bozulmanın sebep olabileceğini ifade etmişlerdir.

Jaya Christyan K G ve arkadaşları. [39] yaptıkları bu çalışmada farklı katman kalınlıkları (0.2mm,0.25mm,0.3mm) ve baskı hızlarının (30mm/s,40mm/s,50mm/s) , ABS+sulu magnezyum silikat kompozit malzemesinin mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, 0.2 mm katman kalınlığı ve baskı hızı 30 mm /s olan numuneler için 43 Newton (N) ile maksimum çekme ve eğilme dayanımı gösterirken 0.25 ve 0.3 mm olan maksimum baskı hızına sahip olan diğer örneklerin mukavemet değerlerinde belirgin bir azalma sergilediğini buna bağlı olarak düşük katman kalınlığı ve düşük baskı hızına sahip numunelerin, daha iyi bir gerilme ve bükülme mukavemeti göstermesi nedeniyle önceki katmanla daha iyi bir yapışma sağlayacağını ifade etmişlerdir.

B. H. Lee ve diğ. [40], FDM (eriyik biriktirme modelleme) tipi yazıcıda ABS (akrilonitril bütadiyen stiren) ham malzemesi kullanılarak oluşturulan prototiplerde en uygun işlem parametrelerini bulmak için Taguchi yöntemi ve süreci takip etmede ANOVA kullanmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada,100,150 ve 200 lik üç farklı yerleştirme açısı ile tabaka kalınlığı, tarama açısı ve hava boşluğunun etkilerinin oluşturulan prototiplerde incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre FDM parametrelerinin, yani katman kalınlığının, tarama açısının ve hava boşluğunun, uyumlu ABS prototipinin elastik performansını önemli ölçüde etkilediği belirtmişlerdir.

C. S. Lee ve diğ.[41] her bir işlemi, tarama yönü, hava boşluğu, boncuk genişliği, renk ve FDM için model sıcaklığı gibi işlem parametreleriyle karakterize etmişlerdir vekatmanlı parçaların basma dayanımını ölçmüşlerdir. Yaptıkları bu çalışmada , enine FDM numunelerinden % 11.6 daha yüksek olan aksenal FDM numunesinin basma dayanımı

41.26MPa olarak bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre aksenel FDM numuneleri için basma dayanımının, enine göre olduğundan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Krawczak (2015) [48] 3 boyutlu FDM tipi yazıcıda ABS ve katkılı ABS termoplastik malzeme kullanarak üretilen malzemelerin mekanik dayanımları üzerinde baskı desenlerinin güçlü bir etkisinin olduğunu, özellikle farklı malzeme kombinasyonlarının bir arada kullanıldığı tasarımlarda, adhezyon açısından baskı desenleri etkisinin daha çok önem arz ettiğini belirtmişlerdir.

1.6.2. Çekirdek Malzemeler

Pollard vd. (2016) [38] FDM tipi 3 boyutlu yazıcı ile üretilen çekirdek malzeme duvar kalınlığı ve üretim hızı parametrelerine bağlı olarak malzemelerin çekme dayanımlarını kıyaslamıştır. Kalın duvarlı numunelerin çekme dayanımlarının daha yüksek olduğunu ve ayrıca artan duvar kalınlığı ile daha sünek bir yapı elde edildiğini belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak geleneksel yöntemlerle üretilen bal peteği tasarımındaki nomex çekirdek malzemesi ile FDM tipi 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ABS çekirdek malzemenin basma dayanımları kıyaslanmıştır. Kalın duvarlı 3 boyutlu yazıcı ile üretilen test numunelerinde nomex çekirdek malzemelerinden daha yüksek basma dayanımı belirlenmiştir.

Yap, vd. (2014) [39] fotopolimer materyalleri kullanarak mürekkep püskürtme bazlı katmanlı üretim teknolojisi ile altıgen, üçgen ve dairesel yapıdaki birim hücre şekillerinin çeşitliliğine sahip ince örgülü petek çekirdek malzemeleri üretmişlerdir. Sonuç olarak çekirdek malzemenin basma dayanım özelliklerinin birim hücre şekli geometrisinden büyük oranda etkilendiğini bildirmişlerdir.

Wang vd. (2005) [40] 3 boyutlu yazıcı ile üretilen çekirdek malzemelerde farklı birim hücre şekillerindeki malzemelerin mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Buna göre üçgen şeklinde birim hücre yapısına sahip çekirdek malzemenin basma dayanımı açısından en düşük dayanımı gösterdiğini bunun sebebi olarak da birbirine değen hücre duvar yüzeyi sayısındaki sınırlamanın hücre duvarlarının plastik deformasyonu üzerinde daha ciddi ve yüksek risk düzeyi oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda, çekirdek malzeme kalınlığının altıgen (bal peteği) desenli çekirdek malzemenin basma dayanımına etkisinin olmadığı ancak birim hücre kalınlığının ve ebatları ile değişen balpeteği yoğunluğunun basma dayanımı üzerine etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Chun Lu vd. (2018) [41] bi-grid, tri-grid, quadri-grid ve kagome-grid desenlerinde sandviç malzemelerinde kullanmak üzere 3 boyutlu yazıcı kullanarak PLA hammadesinden çekirdek malzemesi üretmişlerdir. Ürettikleri çekirdek malzemelerine 3 nokta eğme testi uygulamışlar ve sonlu elamanlar analiz yöntemi kullanarak yük dağılımını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre quadri-grid desene sahip sandviç malzemelerin mekanik özelliklerinin diğer 3 desene göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdi.

1.6.3. Sandviç Kompozit Malzemeler

T. Li ve arkadaşları [42] 3D baskı tekniğini, sayısal analizi ve deneyleri çeşitli bükme davranışları sergileyen yeni bir sandviç kompozit sınıfı tasarlamak için birleştirmişlerdir. Bu programlı sandviç yapıları, truss, konvansiyonel petek ve yeniden giriş bal peteği topolojileri ile 3D baskılı çekirdek malzemeleri içermektedir. Bu sandviç kompozitlerin bükülme davranışını, iki tip karbon fiberle güçlendirilmiş polimer yüz levhası ile incelemek için üç noktadan bükme testi yapmışlardır Deneysel ve sayısal sonuçlarda ise, bükme özelliklerinin yanı sıra hasar mekanizmalarını incelemek için desenli çekirdek malzemelerinin de kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu bulgular, çok çeşitli endüstri ve uygulamalara fayda sağlayabilecek olan sandviç yapıların doğrusal olmayan mekanik tepkisi çalışmasında yeni bilgiler sunmaktadır.

H. Yazdani Sarvestan vd [43] Üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş dikdörtgen altıgen ve oksetik geometrik desene sahip çekirdek malzemelerine teorik ve deneysel olarak darbe dayanımı testi uygulamışlardır. Dikdörtgen, altıgen ve auxetic(Re-entrant) desene sahip numuneler düzlem içi ve düzlem dışı olacak şekilde iki farklı yönelimde üretilmiştir. Bu numunelere uygulanan testler sonucunda elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar ışığında 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen auxetic desenli çekirdek malzemelerinin darbe emilim değeri açısından sandviç kompozit malzemelerde kullanımına uygun olduğu belirlenmiştir.

Hou vd. (2013) [44] de kademeli çekirdek malzemelerden (oksetik ve balpeteği malzeme geçişli) ürettikleri sandviç kompozitlerin basma test sonuçlarının geleneksel sandviç kompozitlerden daha yüksek olduğunu ve düşük hızda darbe testi sonucunda da oksetik kısmın balpeteği kısmına göre çok daha yüksek enerji absorblama eğilimi gösterdiğini belirlemiştir.

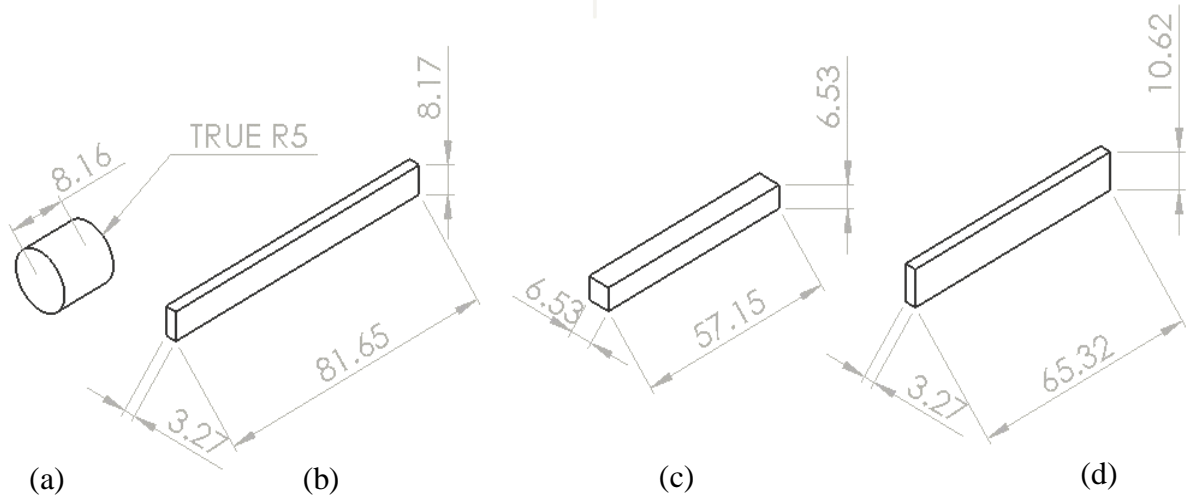
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Tasarım

2.1.1. Standart Deney Numunelerinin Tasarımı

Çekirdek numunelerin üretimine başlamadan önce, mekanik ve fiziksel özelliklerin optimize edilmesi amacıyla özellikle farklı hammadde türlerinden oluşabilecek muhtemel üretim hatalarının önüne geçebilmek için ABS (Akrilonitril Bütadiyen Stiren), PLA (Polilaktik asit), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), HIPS (High Impact Polistiren) termoplastik filamentleri kullanılarak, %100 doluluk oranlarında test numuneleri üretilmiştir.

Çekme, eğme, basma ve darbe deney numuneleri bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı olan Solidworks kullanılarak tasarlanmıştır. Bu tasarımların teknik resmi Şekil 2.1’ de milimetre (mm) cinsinden verilen ölçülerde tasarlanmıştır. Tasarımlar 3 boyutlu yazıcıların çalışması için gerekli olan dilimleyici programlara aktarılabilmesi için Solidworks programı kullanılarak STL (Standart Üçgen Dili) formatına dönüştürülmüştür.

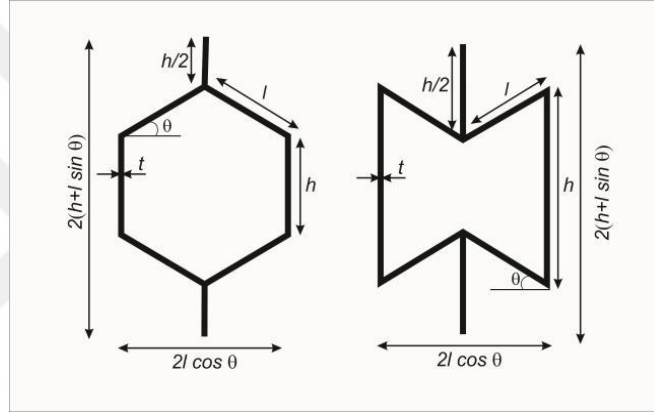


Şekil 2.1. Mekanik deneylerde kullanılan numunelerin teknik resimleri ; (a) basma deneyi numunesi tasarımı, (b) çekme deneyi numunesi tasarımı, (c) darbe deneyi numunesi tasarımı, (d) eğme deneyi numunesi tasarımı

2.1.2. Çekirdek Malzeme Tasarımı

2.1.2.1. Çekirdek Malzemenin Hücre Tasarımı

Bu çalışmada, petek malzeme tasarımlarının seçiminde yaygın olarak kullanılan ticari bal peteği ve Re-entrant desenindeki öksetik tasarımlar, karşılaştırma için referans olarak belirlenmiştir. Petek ve Reentrant desenlerinin hücre tasarımında kullanılan geometri, Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2. Bal peteği ve re-entrant hücre geometrisi

Her bir hücre geometrisi için bağıl yoğunluk aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{p^*}{p_s} = \frac{t/l(h/(l+2))}{2\cos\theta(h/(l+\sin\theta))} \quad (2.1)$$

Bu çalışmada üretilecek olan çekirdek malzemeler hücre geometrisinde duvar kalınlıkları (t) 0,6 mm, 0,8 mm ve 1 mm olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, bal peteği ve re-entrant desenli çekirdek malzemelerinin bağıl yoğunlukları denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bağıl yoğunluk değerleri Tablo 2.1' de verilmiştir. Petek ve re-entrant desenlerinde, birim hücre duvarı uzunlukları (h) 6-8-10 mm olarak belirlenmiştir.

Petek ve re-entrant hücre tasarımı için tasarım parametrelerinin detayları Tablo 2.2'de listelenmiştir.

Tablo 2.1. Farklı geometrik değerlerdeki bal peteği ve re-entrant desenlerinin bağlı yoğunluk değerleri

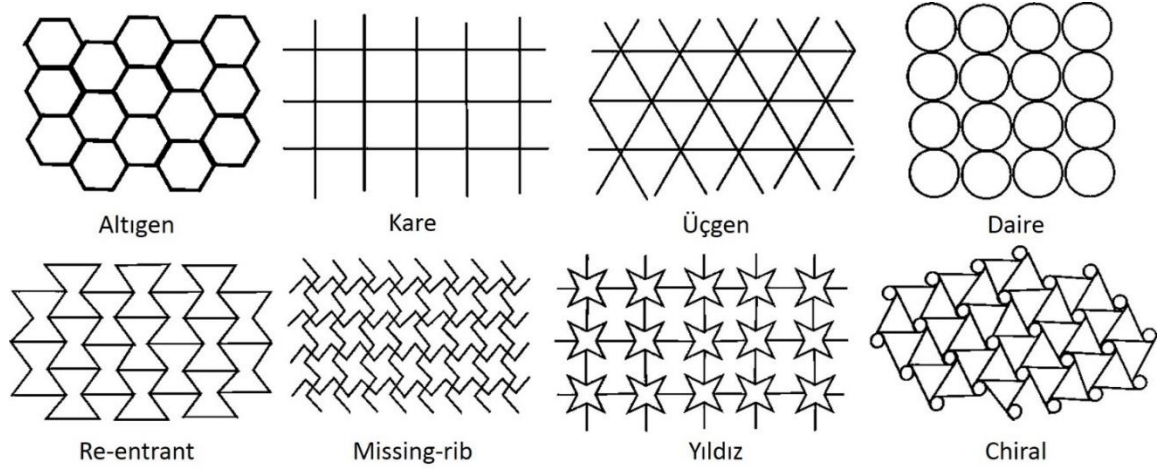
Duvar Kalınlığı & Hücre Duvar Uzunluğu (mm)	Bağlı Yoğunluk (p^*/p_s)	
	Bal peteği	Re-entrant
6mm -0.6mm	0.23	0.30
8mm -0.6mm	0.17	0.23
10mm -0.6mm	0.13	0.12
6mm -0.8mm	0.30	0.41
6mm -1mm	0.38	0.51

Tablo 2.2. Balpeteği ve Re-entrant hücre tasarım parametreleri

Geometri Parametreleri	Bal peteği	Re-entrant
Hücre Duvar Uzunluğu (h) [mm]	6-8-10	6-8-10
Hücre Duvar Uzunluğu (l) [mm]	6-8-10	3-4-5
Hücre Duvar Kalınlığı (t) [mm]	0.6-0.8-1	0.6-0.8-1
Hücre Duvar Açısı (Θ) [$^\circ$]	30	30

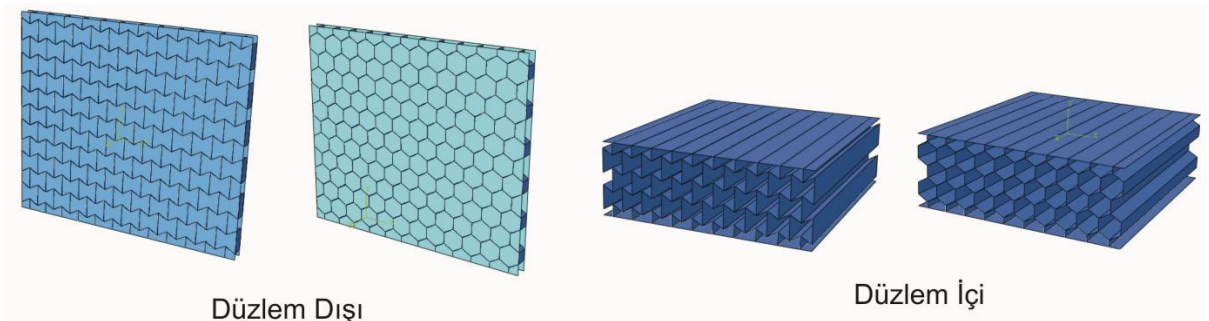
2.1.2.2. Çekirdek Malzemenin Yapısal Tasarımı

Bu çalışmada çekirdek malzeme tasarımında 4 hücreli (Altıgen, Kare, Üçgen, Daire) ve 4 öksetik (Re-entrant, Missing-rib, Yıldız, Kiral) desen olmak üzere 8 farklı desen kullanılmıştır (Şekil 2.3). Çekirdek malzeme tasarımlarının seçiminde, yaygın olarak kullanılan ticari bal peteği ve re-entrant desenine sahip hücreli ve öksetik tasarımlar kıyaslama yapabilmek amacıyla referans olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Tasarlanan hücresel ve öksetik desenler

Tüm öksetik ve hücresel desenlere sahip çekirdek malzemelerin hücre geometrisi, hücre uzunluğu 6 mm ve duvar kalınlığı 0.6 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Bununla birlikte, Tablo 2.4' de gösterildiği gibi, re-entrant ve bal peteği desenine sahip çekirdek malzemelerde hücre uzunluğu ve duvar kalınlığının basma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için duvar kalınlığı 0.6, 0.8 ve 1 mm ve hücre uzunluğu 6, 8 ve 10 mm olan numuneler de tasarlanmıştır. Ayrıca Şekil 2.4' da verildiği gibi bal peteği ve re-entrant tipi çekirdek malzemeler için düzlem dışı ve düzlem içi olacak şekilde üretilerek geniş yüzeye dik ve paralel olacak şekilde basma testi (ASTM C 364 edgewise, ASTM C 365, flatwise) gerçekleştirileceğinden dolayı farklı boyut ve kalınlıklarda numuneler tasarlanmıştır.



Şekil 2.4. Düzlem ve düzlem dışı olarak tasarlanmış balpeteği ve re-entrant çekirdek malzemeler

Üretilecek olan tüm çekirdek malzemeler için tasarım parametreleri tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3. Çekirdek Malzeme Tasarım Parametreleri

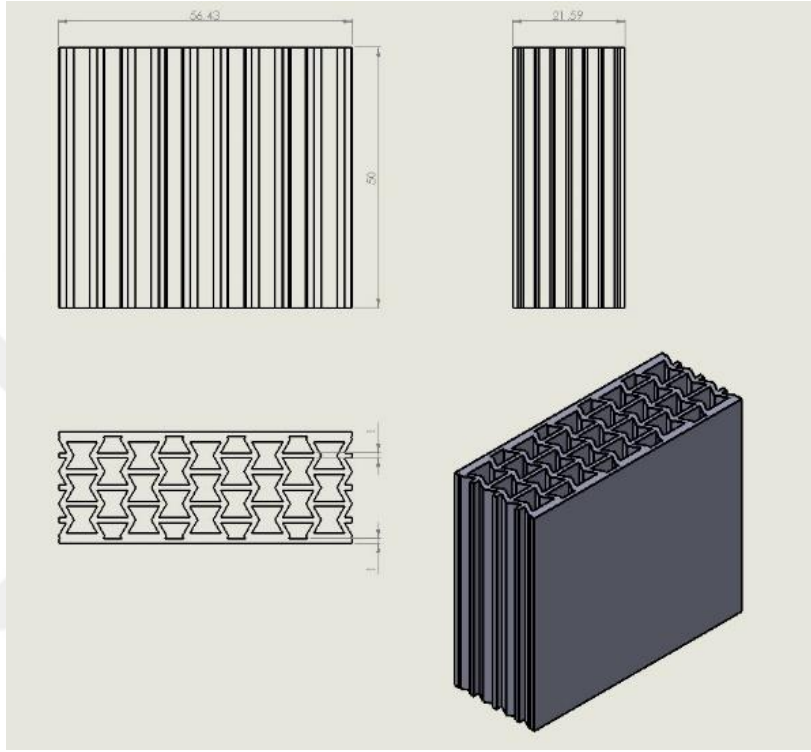
	Hücre Deseni	Hammadde Türü	Hücre Duvar Kalınlığı, t [mm]	Hücre Duvar Uzunluğu, l [mm]
1	Kare	ABS	0,6	6
2	Üçgen	ABS	0,6	6
3	Daire	ABS	0,6	6
4	Altıgen (Balpeteği)	ABS	0,6	6
5	Altıgen	PLA	0,6	6
6	Altıgen	PET-G	0,6	6
7	Altıgen	HIPS	0,6	6
8	Altıgen	ABS	0,8	6
9	Altıgen	ABS	1	6
10	Altıgen	ABS	0,6	8
11	Altıgen	ABS	0,6	10
12	Öksetik Missing-rib	ABS	0,6	6
13	Öksetik Kiral	ABS	0,6	6
14	Öksetik Star	ABS	0,6	6
15	Öksetik re-entrant	ABS	0,6	6
16	Öksetik re-entrant	PLA	0,6	6
17	Öksetik re-entrant	PET-G	0,6	6
18	Öksetik re-entrant	HIPS	0,6	6
19	Öksetik re-entrant	ABS	0,8	6
20	Öksetik re-entrant	ABS	1	6
21	Öksetik re-entrant	ABS	0,6	8
22	Öksetik re-entrant	ABS	0,6	10

Solidworks programında tasarlanan farklı desene sahip çekirdek malzemeleri standart deney numunelerinde de olduğu gibi üretimde kullanılacak olan yazıcının baskı parametrelerinin kontrol edilmesini sağlayan programa aktarılacak amacıyla STL dönüştürülmüştür.

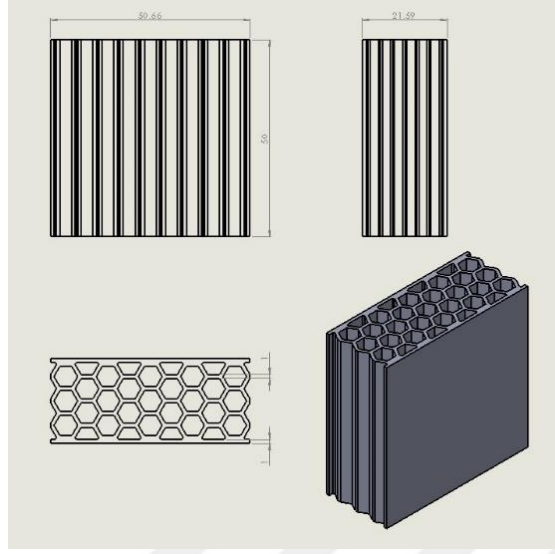
2.1.3. Sandviç Kompozit Malzemelerde Kullanılacak Olan Çekirdek Malzemelerinin Tasarlanması

Sandviç kompozit malzeme testlerinde kullanılacak olan farklı desen ve boyutlardaki çekirdek malzeme numuneleri(Tablo 2.12) bir CAD (Computer Assign Design) programı

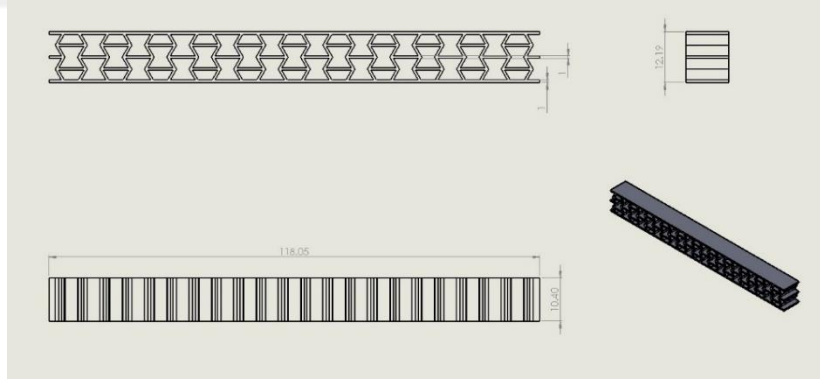
olan Solidworks kullanılarak tasarlanmış olup baskı için gerekli olan STL (Standart Triangle Language) formatına dönüştürülmüştür. Bu tasarımlara ait teknik resimler Şekil 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 ve 2.10' da verilmiştir.



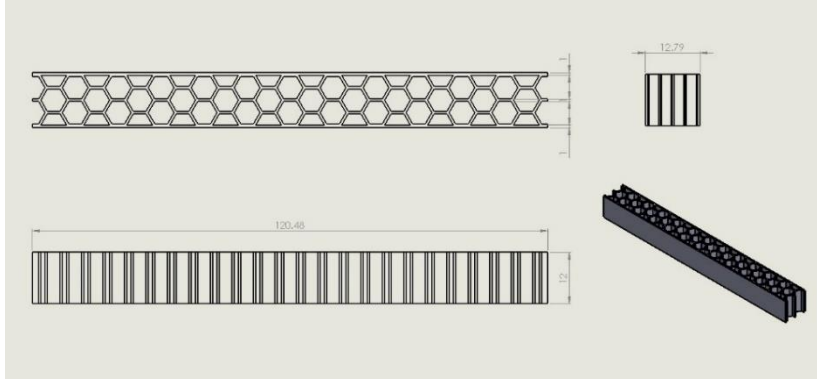
Şekil 2.5. Sandviç panel dikine (Edgewise) basma testi, sandviç panel enine (Flatwise) basma testi ve yüzeye dik doğrultuda çekme deneyi (Flatwise) testi için kullanılacak olan Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi



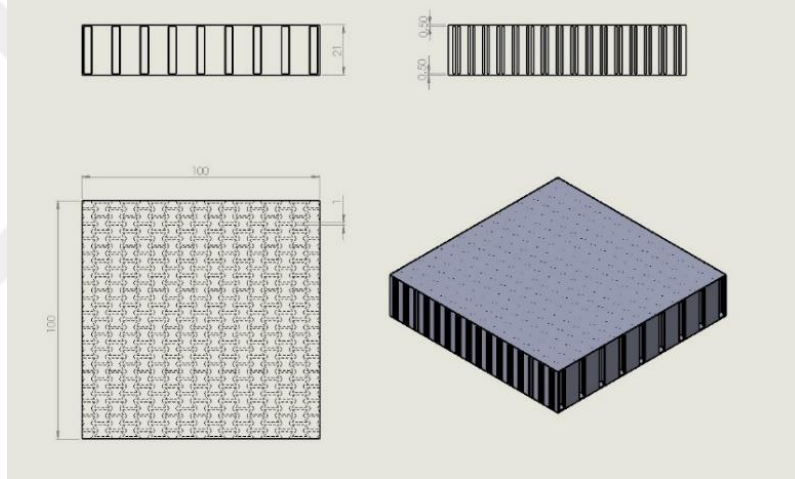
Şekil 2.6. Sandviç panel dikine (Edgewise) basma testi, sandviç panel enine (Flatwise) basma testi ve yüzeye dik doğrultuda çekme deneyi (Flatwise) testi için kullanılacak olan altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi



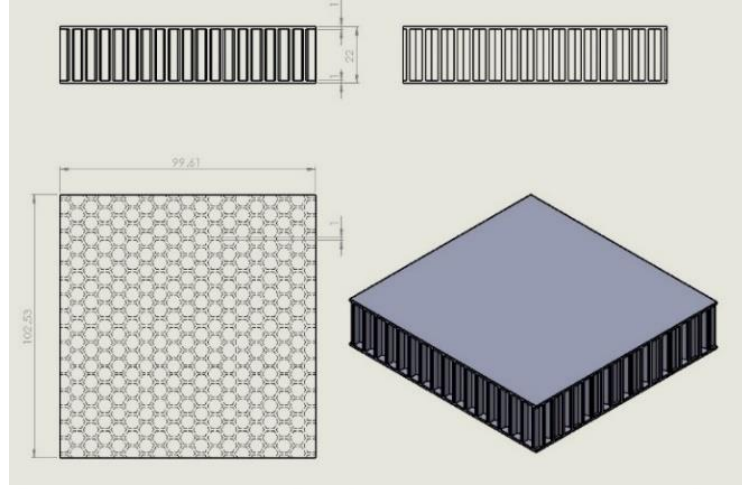
Şekil 2.7. Üç nokta eğilme testinde kullanılacak olan Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi



Şekil 2.8. Üç nokta eğilme testinde kullanılacak olan altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesi teknik resmi



Şekil 2.9. Ağırlık düşürme testlerinde kullanılmak üzere üretilen üç farklı kalınlıktaki çekirdek malzeme numunelerinden 21mm kalınlıktaki Re-entrant desenli çekirdek malzeme numunesinin teknik resmi

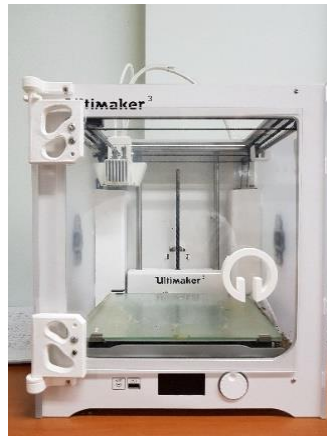


Şekil 2.10. Ağırlık düşürme testlerinde kullanılmak üzere üretilen üç farklı kalınlıktaki çekirdek malzeme numunelerinden 21mm kalınlıktaki altıgen (balpeteği) desenli çekirdek malzeme numunesinin teknik resmi

2.2. Üretim

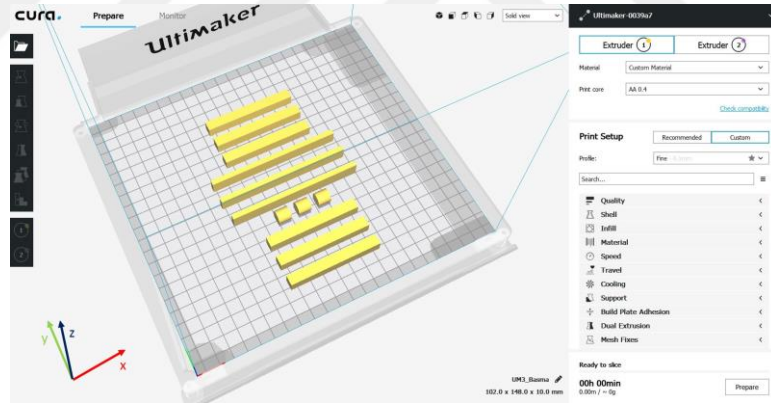
2.2.1. Standart Deney Numunelerinin Üretimi

Mekanik deney numunelerinin üretimi FDM(Eriyik Yığın Modelleme) tipi bir 3 boyutlu yazıcı olan “Ultimaker©” marka “Ultimaker 3” model yazıcıda (Şekik 2.11) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Numunelerinin üretiminde kullanılan 3 boyutlu yazıcı

STL formatına dönüştürülmüş standart deney numunesi tasarımları, 3 boyutlu yazıcıda üretim parametrelerinin kontrol edilmesine imkan sağlayan açık kaynak kodlu bir yazılım olan “Cura” isimli dilimleyici programa aktarılmışlardır. “Cura” isimli programa aktarılan 3 boyutlu eğme, basma, çekme, darbe numunesi modelleri dokuz farklı hammadde türü kullanılarak her bir numune türünden üçer adet 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir (Şekil 2.12). Çekme, eğme, ve basma numunelerinin katman yönelimleri mekanik testlerde uygulanacak olan yükün yönüne paralel yönde olması için baskı tablasında Y yönünde (baskı yönüne paralel) konumlandırılmıştır. Darbe numunelerinde ise baskı yönü değiştirilmemiş ancak deneyin uygulanacağı cihaza katman yönelimleri yükün yönüne dik olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 2.12. Numunelerinin üretim öncesi Cura programındaki düzenlenmesine ait ekran görüntüsü

Standart deney numunelerinin üretiminde kullanılan dört farklı termoplastik filament hammaddenin her birinin farklı erime sıcaklıkları olduğundan dolayı her hammadde türü için farklı baskı ve tabla sıcaklıkları (Tablo 2.4) kullanılmıştır.

Tablo 2.4. Numune üretiminde kullanılan hammadde türüne göre baskı sıcaklıkları

Termoplastik Filament Hammadde	Baskı Sıcaklığı (°C)	Yatak Sıcaklığı (°C)
ABS	230	80
PLA	210	60
PETG	220	75
HIPS	215	80

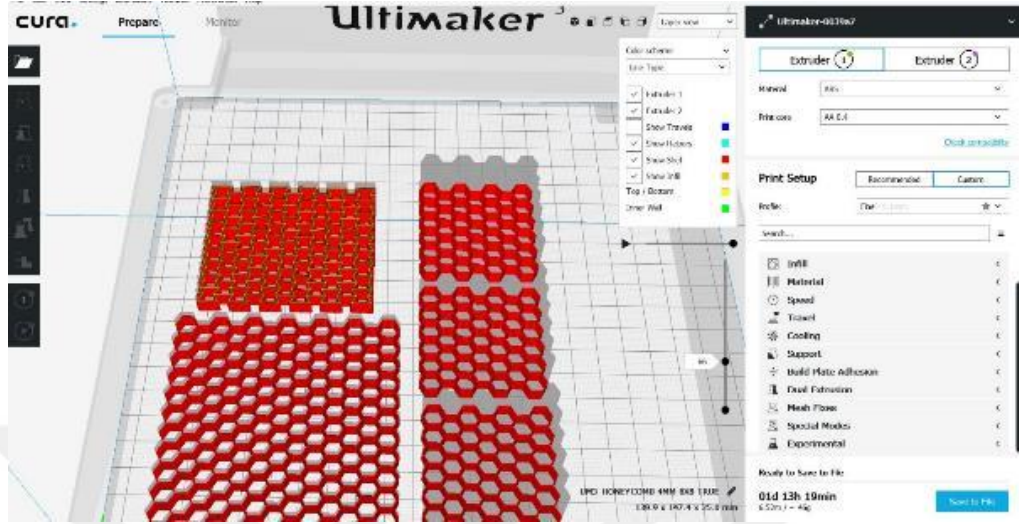
Farklı hammadde türleri kullanılarak üretilen deney numunelerinin her birinde mekanik özelliklerin sağlıklı şekilde karşılaştırılması için baskı sıcaklığı dışındaki katman kalınlığı, doluluk oranı, duvar kalınlığı/sayısı, baskı hızı, soğuma oranı(Fan hızı), doldurma deseni, üst ve alt katman sayısı gibi üretim parametrelerinde Tablo 2.5‘ de verilen aynı değerler kullanılmıştır.

Tablo 2.5. Numune üretiminde kullanılan baskı parametreleri

Üretim Parametresi	Parametre Değerleri
Katman Kalınlığı	0.1 mm
Doluluk Oranı	%100
Duvar Kalınlığı/Sayısı	3
Baskı Hızı	30 mm/sn
Soğuma Oranı (Fan hızı)	%75
Doldurma Deseni	Konsantrik
Üst Katman Sayısı	2
Alt Katman Sayısı	2

2.2.2. Çekirdek Malzeme Üretimi

Farklı hammadde türlerinin üretimi için gerekli yazıcı parametrelerinin optimizasyonu sonrasında 3 boyutlu yazıcı(Ultimaker 3) ile farklı desenlerde, hammaddelerde (ABS, PLA, HIPS, PET-G) ve aynı malzemede farklı hücre boyutu ve duvar kalınlıklarında(Tablo2.2), Bal peteği ve re-entrant desenleri için ise düzlem içi ve düzlem dışı basma testi için çekirdek malzemeleri üretilmiştir. Mekanik test numunelerinin üretiminde olduğu gibi bu üretimde de STL formatına dönüştürülen tasarımlar dilimleyici programa aktarılmış (Şekil 2.13) ve farklı hammadde türlerine göre baskı parametreleri düzenlendikten sonra her bir numune gurubundan üç adet olmak üzere 3 boyutlu yazıcı ile üretimleri gerçekleştirilmiştir.









Şekil 2.13. Dilimleyici programı ara yüzü ve baskıya hazırlanan çekirdek malzemeleri.

2.2.3. Kompozit Çekirdek Malzemelerin Üretilmesi

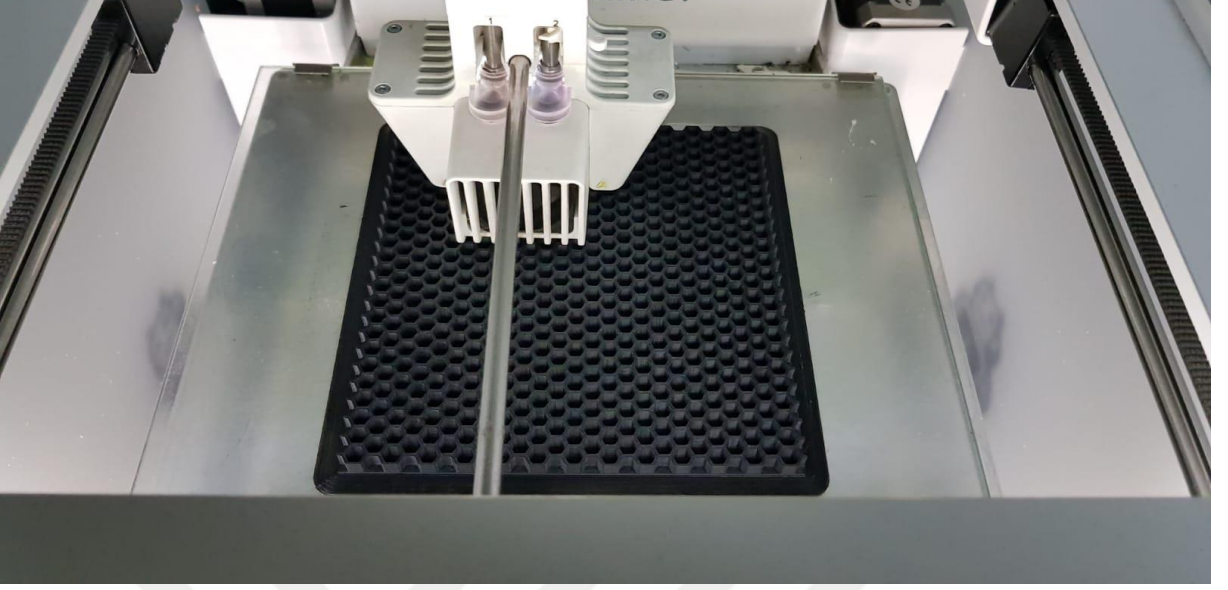
Sandviç kompozit malzeme üretiminde çalışmanın bir önceki basmağı olan çekirdek malzeme test işlemleri sonucu polimer hammadde türü, petek ve oksetik desen tipi ve hücre ebatlarına göre (hücre duvar kalınlığı ve hücre boyu) çekirdek malzemeler optimize edilmiştir. Bu doğrultuda, ABS (Akrilonitril bütadien stiren) hammaddesi, altıgen petek ve re-entrant (oksetik) desenlerde, 6 mm hücre boyu ve 1mm hücre duvar kalınlığı parametreleri kullanılarak Tablo 2.6' da verilen test işlemlerinin her biri için 3 er adet çekirdek malzeme numunesi üretilmiştir. Ayrıca darbe deneyi için çekirdek malzeme kalınlığı ve ağırlık düşürme hızına bağılı olarak da numuneler üretilmiştir.

Tablo 2.6. Sandviç kompozit malzemelere uygulanacak test işlemleri ve kullanılacak çekirdek malzemeler

	Altıgen Deseni		Re-entrant Deseni	
	Duvar Kalınlığı 1mm Hücre Uzunluğu 6mm			
Sandviç Kompozit Malzemelere Uygulanacak Mekanik Testler	Numune Sayısı	Test Numune Görsel	Numune Sayısı	Test Numune Görseli
Sandviç panel dikine (Edgewise) basma testi	3		3	
Sandviç panel enine (Flatwise) basma testi	3		3	
Üç Nokta Eğilme Testi	3		3	

2.2.3.1. Sandviç Kompozit Malzemelerde Kullanılacak Olan Çekirdek Malzemelerinin Üretilmesi

Çekirdek malzeme numunelerinin tasarımları STL formatına dönüştürüldükten sonra üretimde kullanılan Ultimaker 3 model 3 boyutlu yazıcının baskı parametrelerini kontrol etmeye imkan sağlayan Cura isimli dilimleyici programa aktarılmış ve optimize edilen katman kalınlığı, nozul sıcaklığı ve baskı hızı gibi üretim parametreleri kullanılarak baskıya hazır hale getirilmiştir. Sandviç kompozitlerde kullanılacak olan çekirdek malzemeler ABS (Ultimaker) filament hammaddesi kullanılarak üretilmiştir. Ağırlık düşürme testlerinde kullanılacak olan altıgen (bal peteği) desenine sahip çekirdek malzeme numunesinin üretim esnasındaki bir görüntüsü Şekil 2.14’ de verilmiştir.



Şekil 2.14. Bal peteği desenindeki çekirdek malzemenin 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretimi

2.2.3.2. Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretiminde Kullanılacak Olan Karbon Epoksi Prepreg Kompozit Malzemelerin Kesilmesi

Sandviç kompozit malzeme üretiminde kullanılacak olan karbon yüzey tabakalarının üretimleri için otoklav dışı üretme uygun prepreg malzeme (VTP H300, SPM) kullanılarak sıcak pres altında istenen elyaf hacim oranı (istenen kalınlık) doğrultusunda kürleme işlemi yapılarak üretilmiştir. Bu maksatla 200g/m^2 elyaf ağırlığına sahip twill örgü desenine sahip %50 elyaf hacim oranına sahip karbon epoksi prepregler kullanılmıştır. Epoksi reçine 120°C de camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Prepregler 3 kat olmak üzere serildikten sonra aşağıda verilen kürleşme sıcaklık ve zaman periyoduna uygun şekilde 10 bar basınç altında kürleştirilmiştir. Bu şekilde üretilen kompozitlerde %55 elyaf hacim oranına ulaşılmıştır. Üretilen bu kompozit plakalardan çekirdek malzeme boyutlarına uygun şekilde yüzey tabakaları elmas uçlu dairesel testere kullanılarak kesilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Sandviç kompozit malzemelerde kullanılacak olan kompozit karbon yüzey tabaka malzemelerin elmas uçlu dairesel testere ile kesilmesi

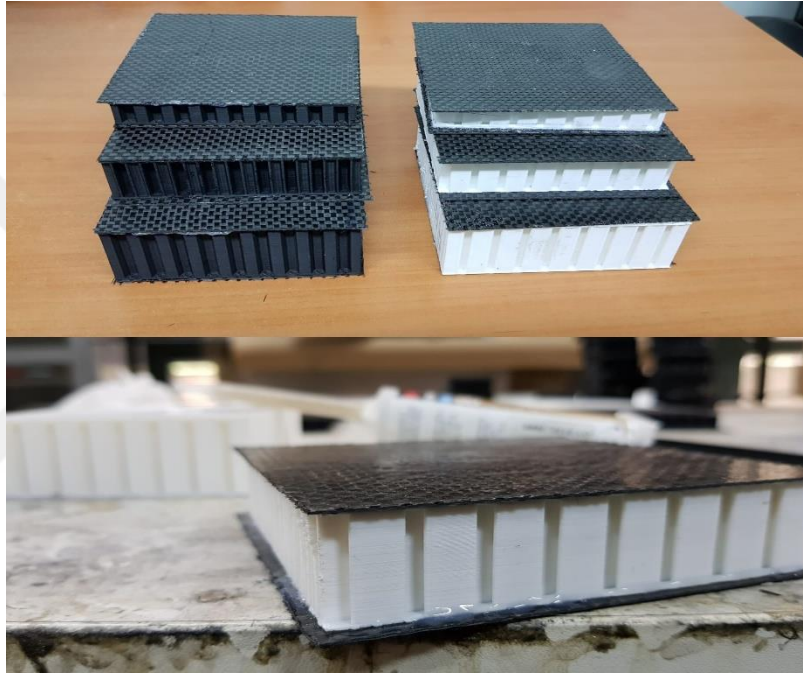
2.2.3.3. Çekirdek Malzemeler ile Yüzey Tabaklarının Yapıştırılarak Sandviç Kompozit Malzemelerin Üretilmesi

Proje kapsamında üretilen çekirdek malzemelerin yüzeylerine ve karbon yüzey tabakları 3M Scotch-Weld marka DP 8005 model akrilik temelli yapısal yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Çekirdek malzemelerin ve kompozit yüzey tabakalarının yapısal yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi

Yapıştırılan malzemeler ahşap plakalar arasına yerleştirilmiştir ve bu plakalara mengenerler yardımıyla baskı uygulanmıştır. Daha sonra plakalar arasında baskı uygulanmış şekilde, kullanılan yapısal yapıştırıcının üretici firmanın önerdiği ideal kürleme sıcaklığı ve süresi olan 40 °C ve 24 saatte etüv fırınında kürlenmiştir. Yapısal yapıştırıcının kürleme işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan sandviç kompozit malzemelere ait örnek fotoğraflar Şekil 2.17' de verilmiştir.

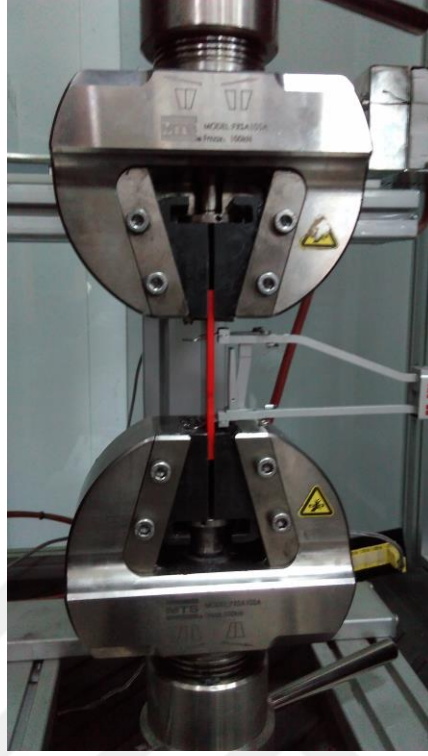


Şekil 2.17. Ağırlık düşürme testlerinde kullanılacak Sandviç kompozit test numuneleri

2.3. Testler

2.3.1. Standart Deney Numunelerine Mekanik Testlerin uygulanması

Çekme, eğme, ve basma mekanik testleri MTS model 45 elektromekanik test cihazında (10 kN yük hücresi kullanılarak) çapraz kafa hızı 5mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.18). Her bir numune grubu için aynı test türünden elde edilen 3 verinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 2.18. MTS model 45 elektromekanik test cihazı CPE numunesi çekme testi

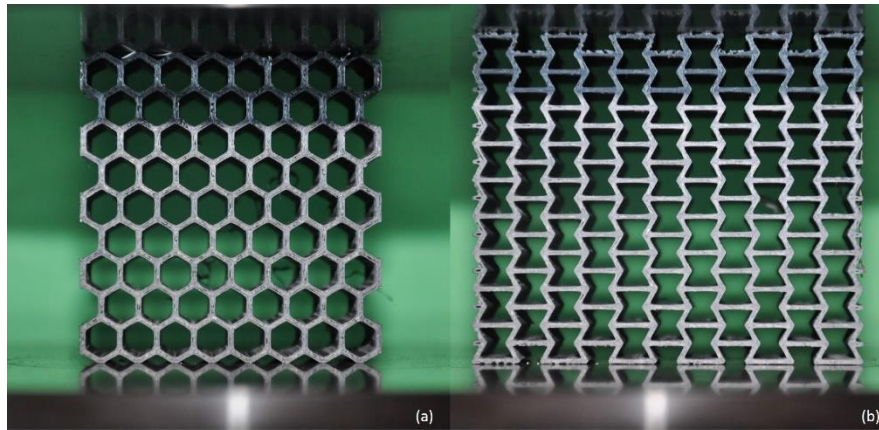
Darbe numunelerinin testleri, Instron marka darbe test cihazında standartlara uygun olarak çentik açılmadan oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2.19). Numuneler 3 boyutlu yazıcı kullanılarak ASTM E-23 standardına göre üretilmiştir. Numunelere test uygulandıktan sonra ve numunelerin darbe mukavemeti değerleri belirlenmiş ve elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Test numunelerini kırmak için 50 J kapasiteli çekiç kullanılmıştır.



Şekil 2.19. Instron marka Charpy darbe test cihaz

2.3.2. Çekirdek Malzemelere Düzlem İçi ve Düzlem Dışı Uygulanan Basma Testi

Düzlem içi ve düzlem dışı basma testi için her bir numune grubundan üç adet numune test edilmiş ve aynı numune grubundan olan numunelerin gerilme-gerilim grafiklerinin oluşturulmasında üç ölçümün ortalama değerleri kullanılmıştır. Basma testleri (ASTM C364-ASTM C365) 10 kN yük hücresine sahip MTS üniversal model 45 test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test süresince çeşitli yükleme koşullarında numunelerin deformasyonu 60FPS video kamera ile kaydedilmiştir. Bal peteği ve re-entrant desenlerine sahip çekirdek malzemelerin düzlem için numunelerinin test başlamadan önce kaydedilen görüntüleri şekil 2.20' de verilmiştir.



Şekil 2.20. Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenli düzlem içi basma testi numuneleri

2.3.3. Sandviç Kompozit Malzemelerin Mekanik Testleri

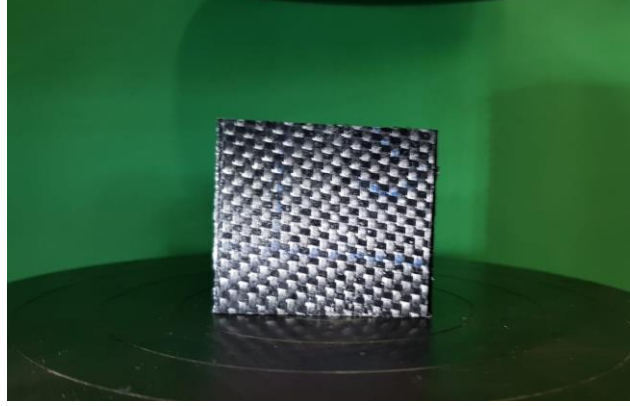
2.3.3.1. Sandviç Panel Dikine (Edgewise) Basma Testi

Bu test metodu, sandviç plakaların yüzey düzlemine paralel doğrultuda basma özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu test yönteminin uygulanması için ASTM C 364 numaralı standartlarına uygun olacak boyutlarda (50x50x12mm) üretilen test numunelerin kullanılmıştır. Bu test MTS üniversal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. MTS üniversal test cihazı

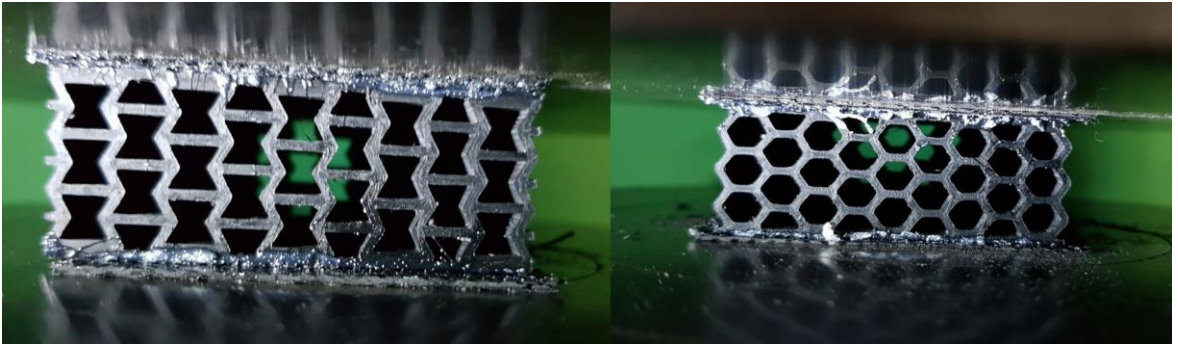
Test numunesinin basma testi öncesine ait fotoğrafı Şekil 2.22' de verilmiştir.



Şekil 2.22. Test numunelerinin basma testi öncesi çekilen fotoğraflar

2.3.3.2. Sandviç Panel Enine (Flatwise) Basma Testi

Bu test yönteminin uygulanması için ASTM C 365 numaralı standart kullanılmıştır. Bu standarda göre MTS marka üniversal test cihazında numunelere 10 kN yük altında hareketli çene ile 0,5 mm/dk ilerleme hızında 50x50x12mm ebatlarında sandviç yüzeyine dik doğrultuda basma işlemi uygulanır. Bu test metodu, sandviç yapıların basma dayanımının ve elastikiyet modülünün belirlenmesi amacıyla kullanılmış, gerinim ölçümleri ise çapraz kafa hareketi ile ölçülmüştür. Şekil 2.23' de petek ve re-entrant desenli numunelerin test sırasında alınan görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.23. Petek ve re-entrant desenli numunelerin test cihazında çekilen fotoğrafları

2.3.3.3. Üç Nokta Eğilme Testi

Bu test işlemi elektromekanik MTS model 45 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 90 mm olarak ayarlanmış ve test 1mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Bal peteği ve re-entrant desenine sahip eğilme numunelerinin test sırasında alınan yük altında davranışlarını gösteren görüntüler Şekil 2.24' de verilmiştir.



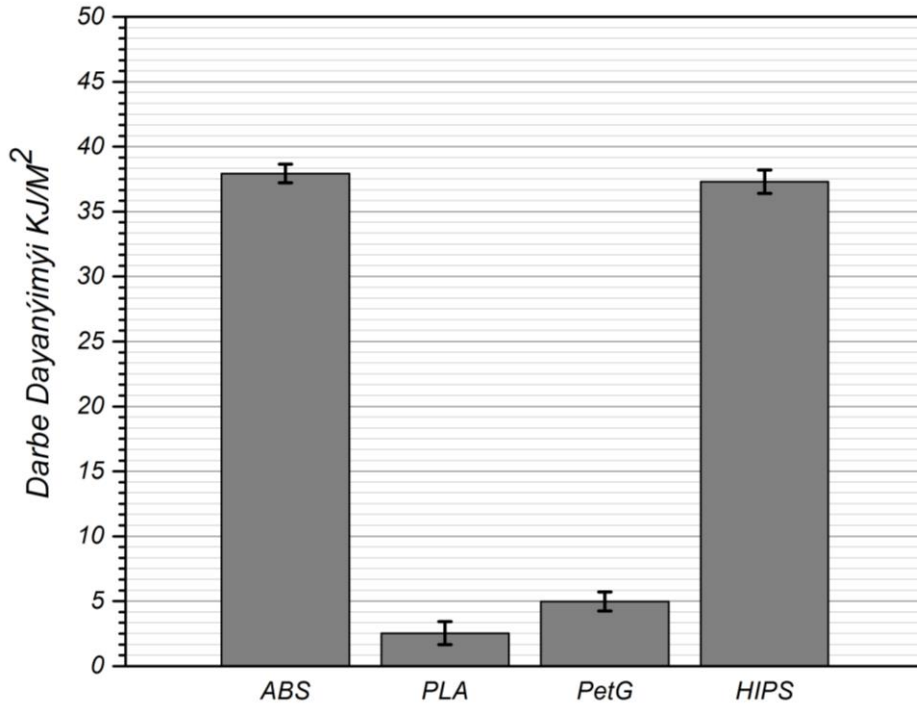
Şekil 2.24. Bal peteği ve re-entrant desene sahip numunelerin eğilme testi sırasındaki görüntüsü

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Standart Deney Numunelerine Uygulanan Mekanik Testler

3.1.1. Darbe Testi

Tez kapsamında yapılan çalışmaların ilk adımı olarak, üretilen numunelere uygulanan darbe testine ait sonuçlar Şekil 3.1 ve Tablo 3.1’ de gösterilmektedir. Yapılan darbe testi sonucunda en yüksek darbe dayanıma sahip malzemenin 37.94 KJ/M^2 ile ABS olduğu belirlenmiş en düşük darbe dayanımına sahip numune ise 2.53 KJ/M^2 değeri ile PLA hammaddesinden üretilen darbe testi numunesidir.



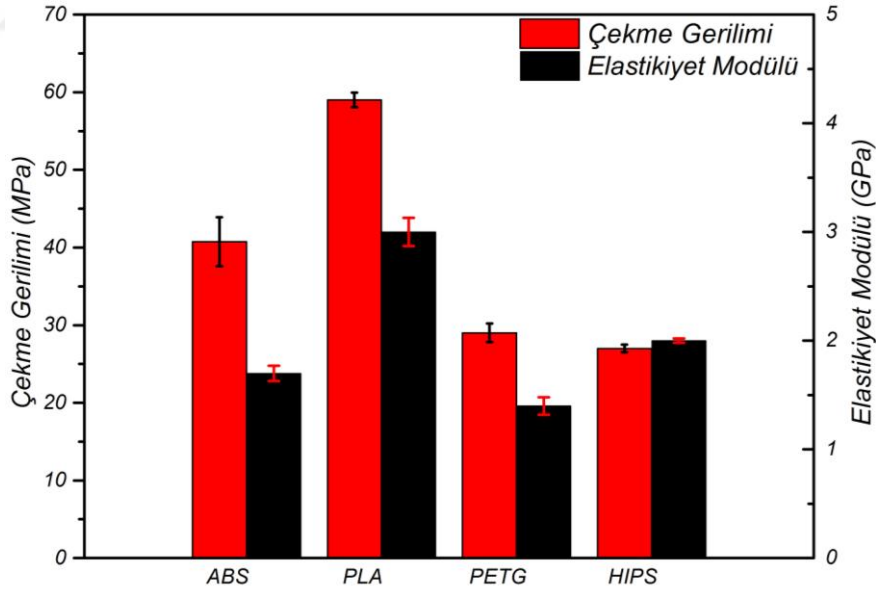
Şekil 3.1. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen test numuneleri darbe dayanımı sonuçları

Tablo 3.1. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait darbe dayanımı testi sonuçları

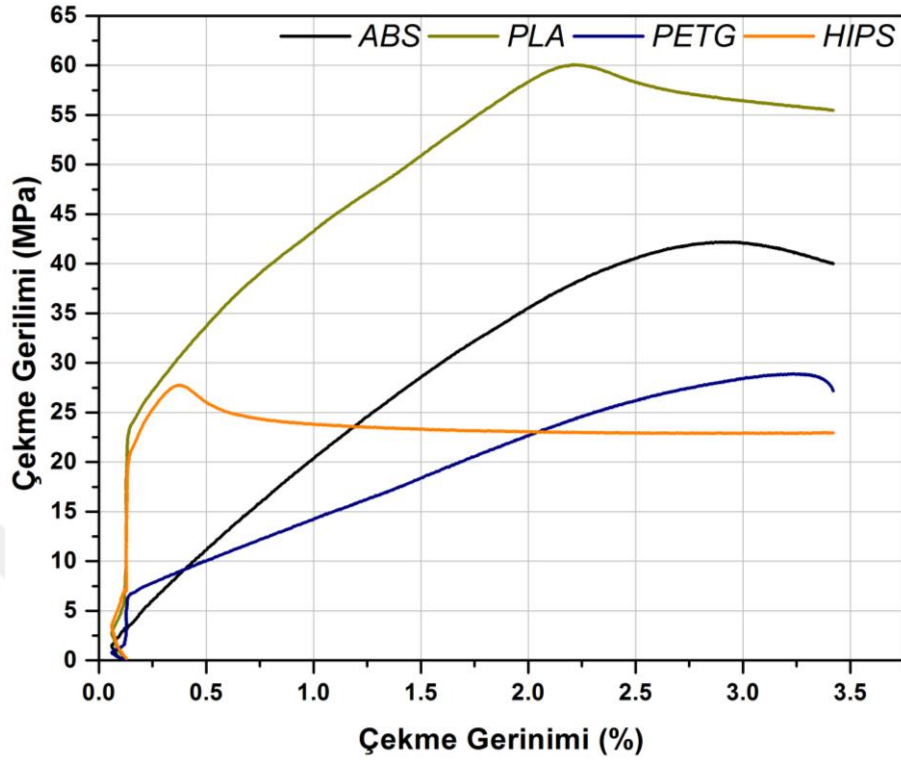
Malzeme	Joule	KJ/M ²	%
ABS	18.97	37.94	225.72
PLA	1.27	2.53	18.92
PETG	0.316	4.97	0.63
HIPS	2.375	37.2	4.74

3.1.2. Çekme Testi

Çekme numunelerine uygulanan testin sonuçlarına ait sütun grafik Şekil 3.2' de verilmiştir. Burda en yüksek çekme gerilim değerini PLA hammaddesi gösterirken 27 MPa çekme gerilim değeriyle en düşük çekme gerilim değerini HIPS hamaddesi göstermiştir.



Şekil 3.2. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonucu sütun grafiği



Şekil 3.3. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonucu grafiği

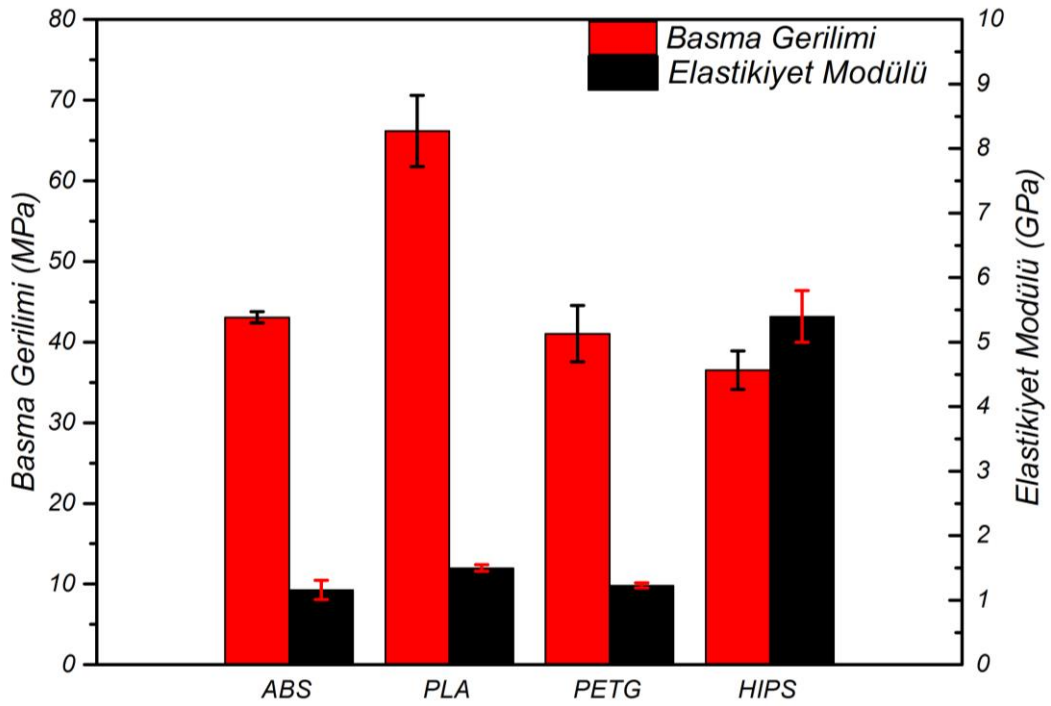
Çekme testi sonucunda elde edilen çekme gerilimi, elastikiyet modülü, akmadaki çekme gerilimi ve kopmadaki çekme gerilimi değerleri Tablo 3.2’ de verilmiştir. En yüksek kopma anındaki çekme gerilim değerleri PLA ve HIPS filamentinden üretilen numunelerde gözlemlenmiştir ve değerleri sırasıyla %4.8 ve %4.2’ dir.

Tablo 3.2. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait çekme testi sonuçları

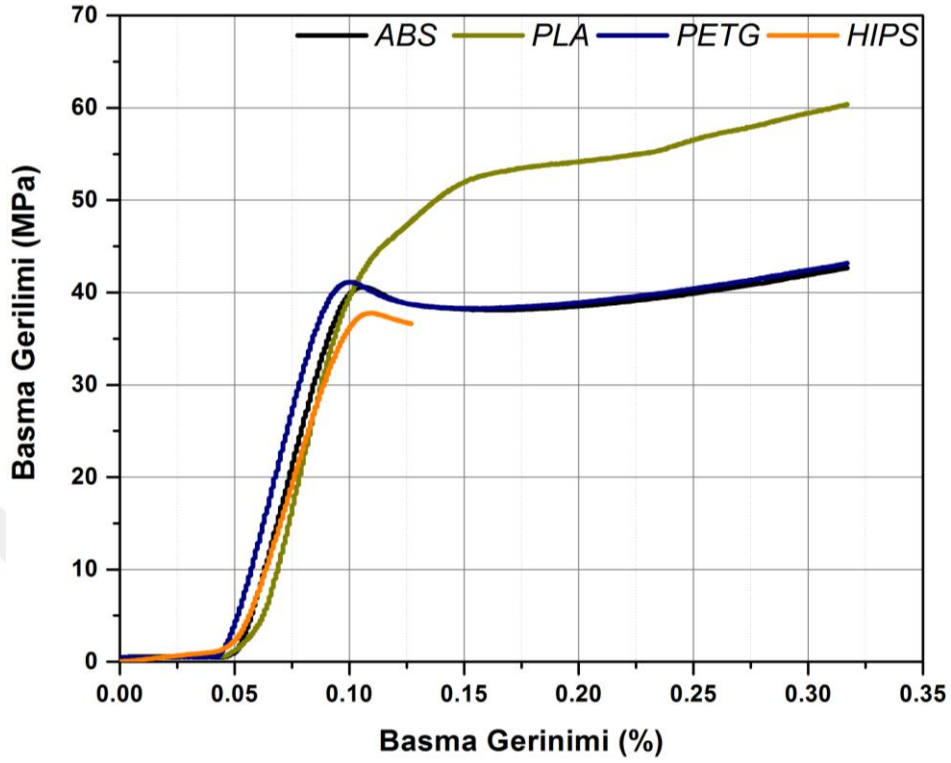
Malzeme	Çekme Gerilimi (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Akmadaki Çekme Gerinimi (%)	Kopmadaki Çekme Gerinimi (%)
ABS	40.75±4.8	1.7±0.1	2.9±0.2	2.9±0.2
PLA	59±2	3±0.1	2±0.1	4.8±0.1
PETG	29±2.6	1.4±0.1	2.6±0.2	2.6±0.1
HIPS	27±0.4	2±0.03	3.6±0.1	4.2±0.1

3.1.3. Basma Testi

Basma testi sütun ve gerilim/gerinim grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ de verilmiştir. Basma testi sonucunda en yüksek basma gerilim değeri PLA’ dan üretilen numunelerde gözlemlenmiştir. Elastikiyet modülleri incelendiğinde en yüksek elastikiyet modüllü değerleri HIPS (5.4 GPa), en düşük elastikiyet modülü değeri ise ABS(1.16 GPa) filamentinden üretilen numunelerde malzemelerinden üretilen numunelerden elde edilmiştir.



Şekil 3.4. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu sütun grafiği



Şekil 3.5. 3 boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu grafiği

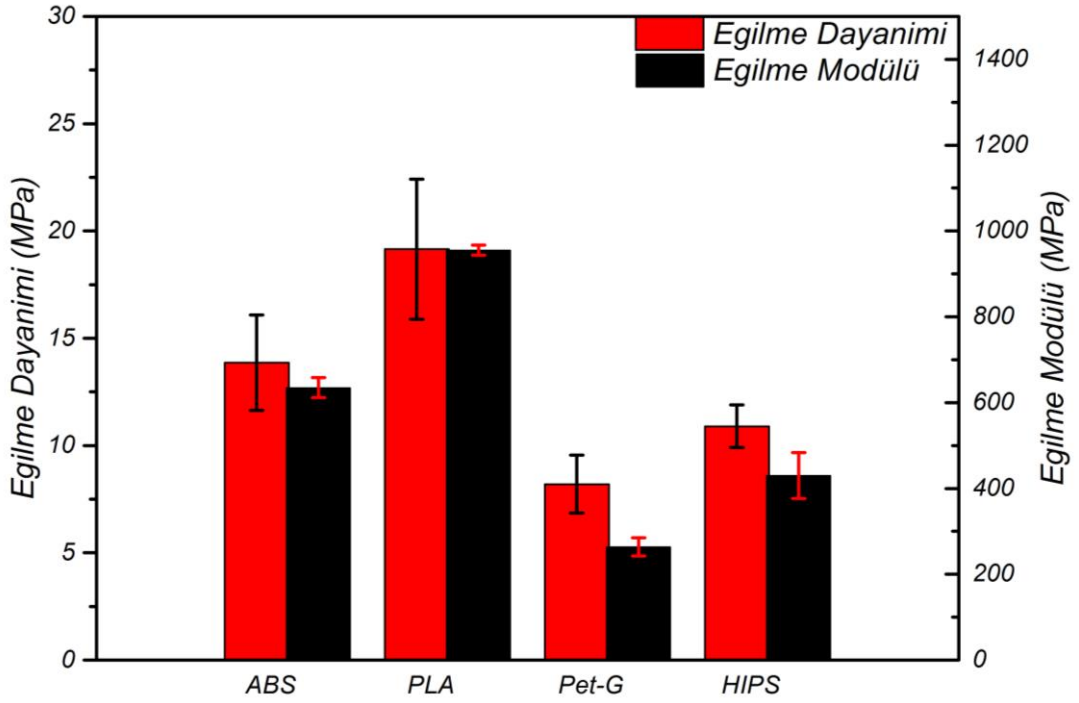
En düşük basma gerilim değerlerinin ortalaması HIPS malzemesinde elde edilirken (27 MPa) en yüksek basma gerilim değer ortalaması PLA malzemelerinden üretilen numunelerde gözlemlenmiştir (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonuçları

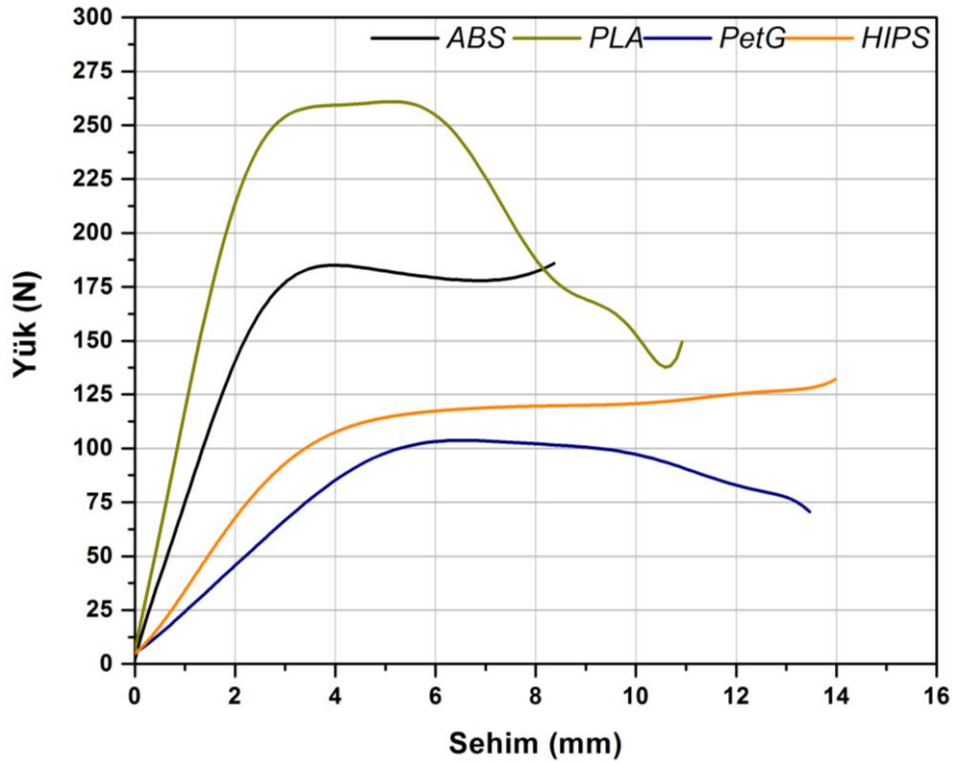
Malzeme	Basma Gerilimi (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)
ABS	43±1.2	1.16±0.4
PLA	66.1±6.2	1.5±0.07
PETG	29.7±5	1.2±0.08
HIPS	27±3.1	5.4±1.2

3.1.4. 3 Nokta Eğme Testi

Eğme testlerinden elde edilen sonuçlara göre en yüksek eğilme dayanımı PLA' dan üretilen numunelerde gözlenirken en düşük eğilme dayanımı PETG den üretilen numunelerde gözlenmiştir. Eğilme testleri verilerinden oluşturulan sütun ve eğilme gerilimi/sehim grafikleri Şekil 3.6 ve 3.7 de verilmiştir.



Şekil 3.6. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait eğme testi sonucu sütun grafiği



Şekil 3.7. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait basma testi sonucu grafiği

Eğilme testinde maksimum yükte en yüksek değerleri sırasıyla PLA (257.4 N) ve ABS (186.4 N) gösterirken en düşük değerleri PETG (104.8 N) filamentinden üretilen numuneler göstermiştir(Tablo 3.4).

Tablo 3.4. Üç boyutlu yazıcıda üretilen farklı tip termoplastiklere ait eğme testi sonuçları

Malzeme	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)	Maksimum Yük (N)
ABS	13.8±4	635.0±42	186.4±43
PLA	19.1±4.6	955.6±36	257.4±47
PETG	8.2±1.4	264±18	104.8±26
HIPS	10.9±0.9	430±70	136.8±14

3.2. Çekirdek Malzeme Testleri

3.2.1. Çekirdek Malzeme Yoğunluk Hesapları

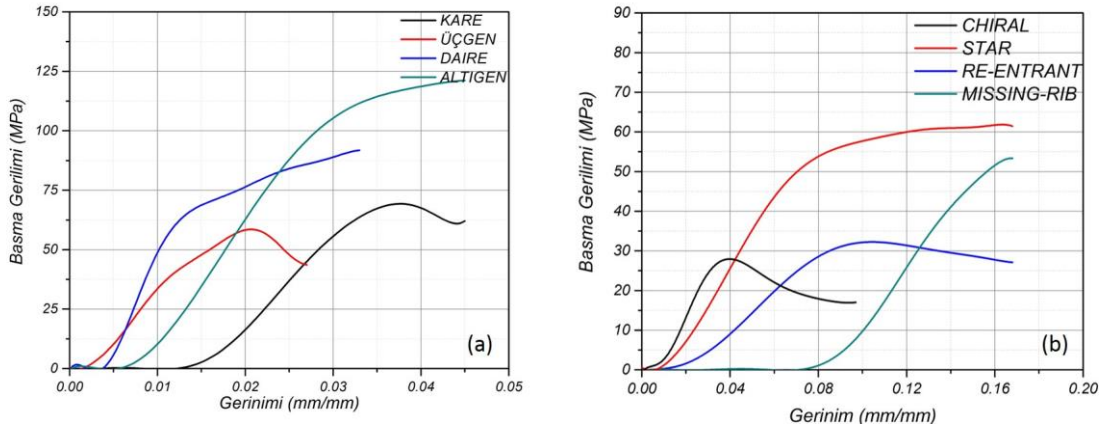
Çalışmanın bu aşamasında ilk olarak tasarlanan çekirdek malzemelerinin bağlı yoğunlukları hesaplanmıştır (Tablo 3.5). Hücre geometrisi ve desenlerin karşılaştırıldığı numunelerin üretiminde ABS filamentini kullanmış farklı malzemelerin kullanıldığı numunelerde ise hücresel desen bal peteği (altıgen) öksetik desen olarak re-entrant seçilmiştir. Hücresel desenlerin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında en yüksek yoğunluğa sahip desen üçgen desendir en yüksek yoğunluğa sahip hücresel geometri ise 1 mm duvar kalınlığı ve 6 mm hücre boyuna sahip geometridir. Öksetik davranışa sahip tasarımlar incelendiğinde ise en yüksek yoğunluğa sahip çekirdek malzeme desen ve geometri, re-entrant deseni ve 1 mm duvar kalınlığı 6 mm hücre uzunluğundaki numunedir.

Tablo 3.5. Çekirdek malzemelerin desen türlerine göre yoğunluk değerleri

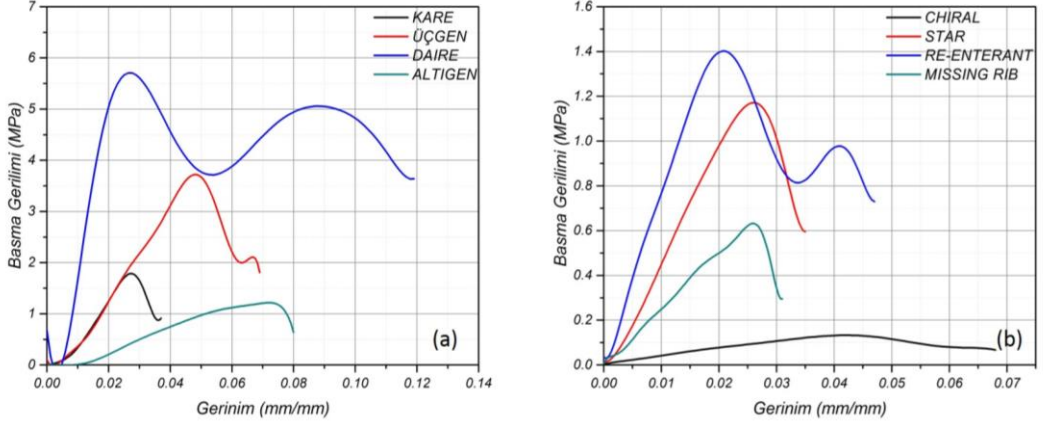
Desen	Yoğunluk (kg/m ³)	Desen	Yoğunluk (kg/m ³)
Kare	193.4	Missing-Rib	309.7
Üçgen	491.3	Star	322.8
Daire	320.6	Kiral	122.2
Altıgen 0,6-6	272.6	Re-entrant 0,6-6	291.1
Altıgen 0,8-6	281.6	Re-entrant 0,8-6	332.1
Altıgen 1-6	294.6	Re-entrant 1-6	402.5
Altıgen 0,6-8	160.4	Re-entrant 0,6-8	192.2
Altıgen 0,6-10	128.9	Re-entrant 0,6-10	121
Altıgen PETG	113.7	Re-entrant PETG	182.3
Altıgen HIPS	124.3	Re-entrant HIPS	191.4
Altıgen PLA	152.6	Re-entrant PLA	121.1

3.2.2. Çekirdek Malzeme Basma Testleri

ABS malzemesinden 0.6 mm duvar kalınlığında, 6 mm hücre uzunluğunda farklı hücresel ve öksetik desenlerde üretilen çekirdek malzemelere uygulanan düzlem içi ve düzlem dışı basma testleri sonuçlarına ait basma gerilim/gerinim grafikleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’ da verilmiştir. Düzlem dışı basma testinde hücresel desenlerde altıgen (bal peteği) öksetik desenlerde ise Star en yüksek basma gerilim değerini vermiştir. Düzlem içi basma testinde ise yüksek bağıl yoğunluk değerine bağlı olarak (Tablo 3.5) hücresel desene sahip çekirdek malzemelerinde daire deseni en yüksek basma gerilim(5.8 MPa) değerini verdiği gözlemlenmiştir. Öksetik desen sahip çekirdek malzemeler uygulanan düzlem içi basma testinde en yüksek değere sahip çekirdek malzemesi re-entrant desenine sahip olan numunede gözlemlenmiştir. Altıgen (bal peteği) desenine sahip çekirdek malzemesi düzlem dışı basma testinden en yüksek düzlem (118 MPa) içi basma testinde ise en düşük basma gerilim değerine (1.2 MPa) sahiptir. Yap, vd. [39] malzeme püskürtmeli (Material jetting, MJ) 3 boyutlu yazıcı kullanarak ürettikleri daire, üçgen ve bal peteği desenlerindeki çekirdek malzemelere düzlem içi basma testi uygulamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada altıgen birim hücrelerinde 6.11 MPa basma dayanımı, üçgen birim hücrelerinde 3.80 MPa, daire birim hücrelerinde 8.06 MPa basma dayanımlarını gözlemlenmişlerdir.

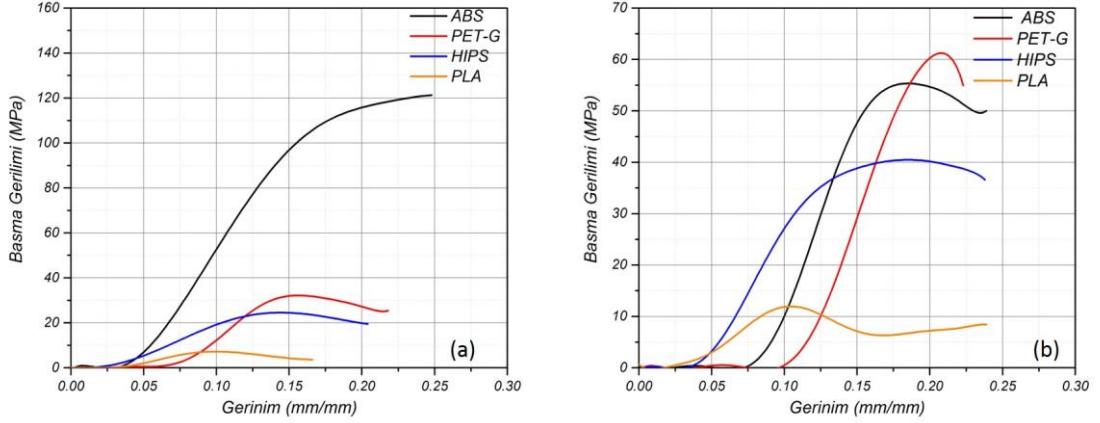


Şekil 3.8. Farklı desenlere sahip ABS çekirdek malzemelerinin (hücresel(a), öksetik(b)) düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri

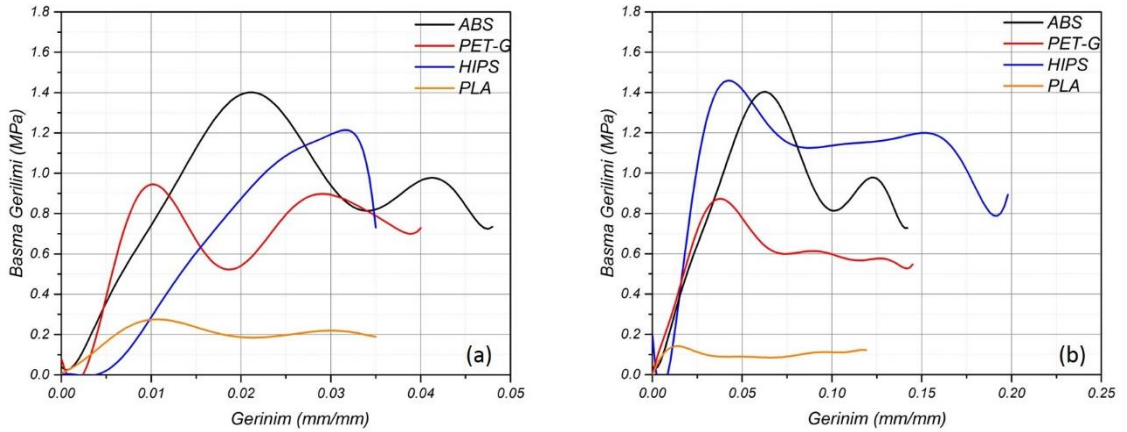


Şekil 3.9. Farklı desenlere sahip ABS çekirdek malzemelerinin (hüresel (a), öksetik (b)) düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de 0.6 mm duvar kalınlığı ve 6 mm hücre uzunluğunda altıgen (bal peteği) ve re-entrant desenlerinde farklı malzemelerden üretilen düzlem dışı ve düzlem içi basma testi gerilim/gerinim grafikleri verilmiştir. Düzlem dışı basma testinde altıgen desene sahip çekirdek malzemelerde en yüksek basma gerilim değeri ABS hammaddesinde re-entrant desene sahip çekirdek numunelerde ise PETG numunesinden üretilen çekirdek malzeme göstermiştir. Ayrıca düzlem içi basma testinde altıgen desende en yüksek basma gerilim değerini yine ABS hammaddesinden üretilen çekirdek malzemesi gösterirken re-entrant desenindeki numunelerde HIPS ve ABS hammaddesinden üretilen çekirdek malzemeler en yüksek değerleri göstermiş olup en hem düzlem içi hem de düzlem dışı basma deneylerinde ise her iki desen tipinde de en düşük basma gerilim değerleri PLA hammaddesinden üretilen numunelerinden elde edilmiştir.



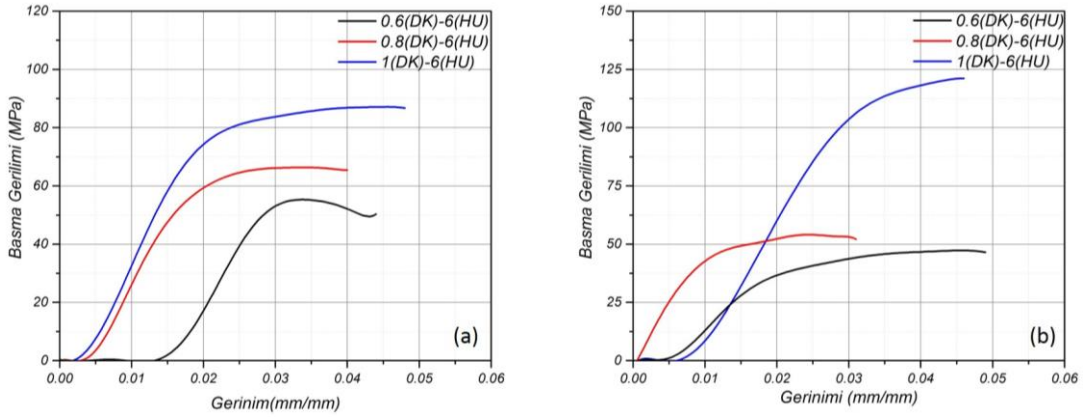
Şekil 3.10. Farklı malzemelerin bal peteği (a) ve re-entrant (b) desenlerde düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri



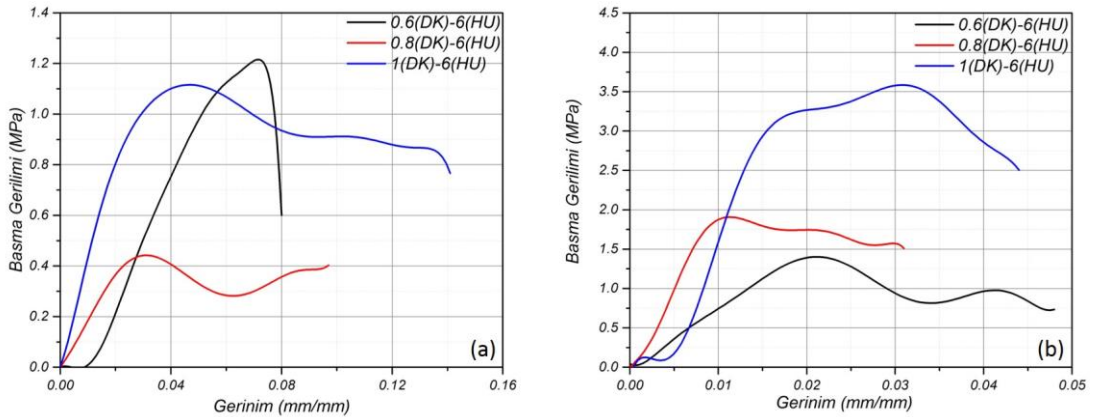
Şekil 3.11. Farklı malzemelerin bal peteği (a) ve re-entrant (b) desenlerde düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri

ABS hammaddesi kullanılarak bal peteği ve re-entrant desenlerine sahip farklı hücre geometrilerindeki çekirdek malzemelerine uygulanan basma testlerinden elde edilen düzlem dışı ve düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de belirtilmiştir. Bu test sonuçlarında, bal peteği desenine sahip çekirdek malzemeler arasında en yüksek değeri 1 mm duvar kalınlığına (DK) sahip çekirdek malzemelerinde gözlemlenirken re-entrant desenine sahip çekirdek malzemeler arasında ise en yüksek değeri 1mm duvar kalınlığına (DK) sahip çekirdek malzemelerde gözlemlenmiştir. Düzlem içi basma testi sonuçları incelendiğinde ise altıgen (bal peteği) desenine sahip çekirdek malzemelerinde 0.6 mm duvar kalınlığındaki re-entrant desende üretilen çekirdek

malzemelerde ise 1 mm duvar kalınlığına sahip numunelerde en yüksek basma gerilim değeri elde edilmiştir. Pollard, vd. [38] FDM tipi 3 boyutlu yazıcı kullanarak üç farklı duvar kalınlığında (0.56, 0.79, 1.11mm) altıgen desene sahip çekirdek malzemeleri üretmişler ve düzlem içi basma testi uygulamışlardır. Yapmış oldukları testler sonucunda numunelerin basma dayanımlarını duvar kalınlığı 1.11 mm olan çekirdek malzeme 18.9 MPa, 0.79 mm duvar kalınlığına sahip çekirdek malzemesinin 29.6 MPa ve 0.56 mm duvar kalınlığına sahip çekirdek malzeme ise 34.5 MPa belirlemiş ve çekirdek malzemelerde duvar kalınlığı arttıkça basma dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.

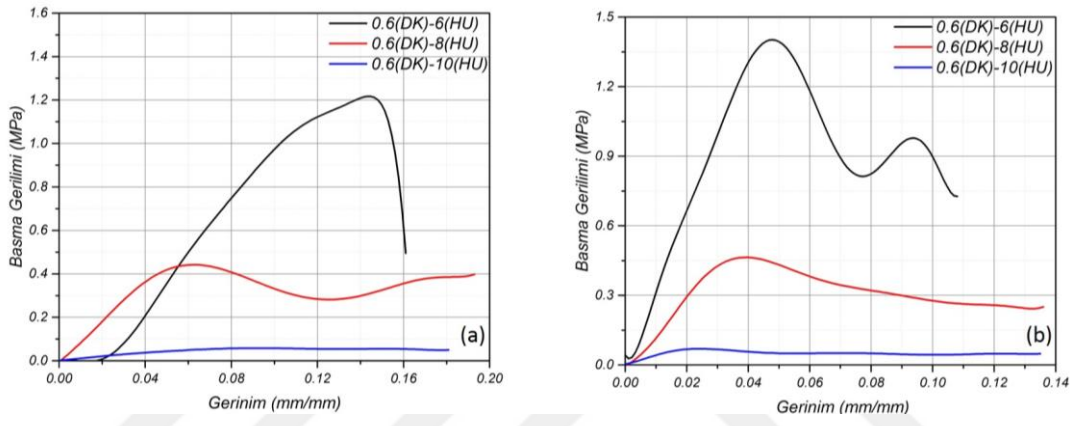


Şekil 3.12. Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri



Şekil 3.13. Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri

ABS hammaddesi kullanılarak aynı duvar kalınlığında farklı hücre boyutunda bal peteği ve re-entrant desenlerde üretilen çekirdek malzemelere ait düzlem içi basma gerilim/gerinim grafikleri Şekil 3.14’ de verilmiştir. Her iki desen tipindeki numunelerde 6mm hücre uzunluğuna sahip çekirdek malzemeleri en yüksek 10 mm hücre uzunluğuna sahip olanlar ise en düşük basma gerilim değerini vermiştir.



Şekil 3.14. Bal peteği(a) ve re-entrant(b) desenine sahip farklı hücre geometrilerindeki ABS çekirdek malzemelerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafikleri

Tablo 3.6’ da farklı desen, hammadde ve geometride üretilen çekirdek malzemelerin düzlem içi basma testi sonucunda elde edilen ortalama basma gerilim değerleri gösterilmektedir. Altıgen (bal peteği) ve re-entrant desene sahip çekirdek malzemelerinde en yüksek basma dayanımının elde edildiği geometri 1 mm duvar kalınlığı, 6 mm hücre uzunluğu tespit edilmiştir. Hücresel desene sahip çekirdek malzemelerde düzlem içi en yüksek basma gerilim değerini daire desenine sahip numune göstermiş buna karşın altıgen desene sahip numuneler en düşük değerleri göstermiştir. Öksetik desene sahip çekirdek malzemelerde ise düzlem içi en yüksek basma gerilim değerini re-entrant desene sahip numuneler gösterirken en düşük de basma gerilim değerini kiral desen sahip numuneler göstermiştir.

Tablo 3.6. Farklı desen, geometri ve malzemelerde üretilen çekirdek malzemelerin ortalama düzlem içi basma gerilim değerleri ve standart sapma değerleri

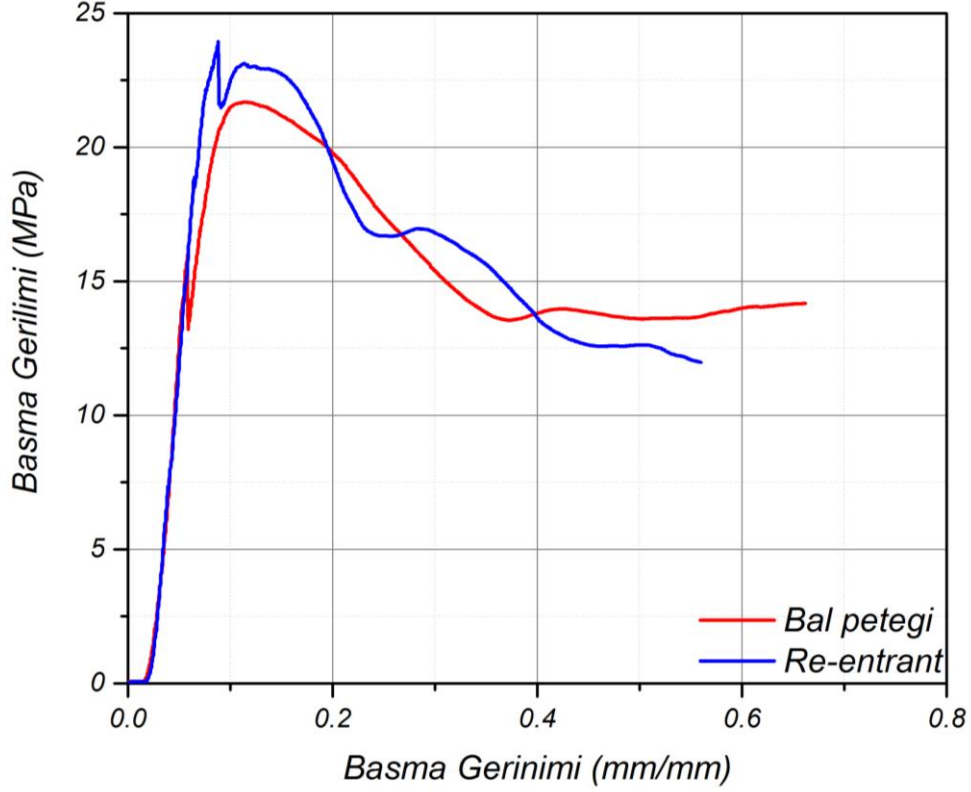
Desen	Ortalama Basma Gerilimi (MPa)	Standart Sapma
Kare ABS 0.6-6	1.71	0.61
Daire ABS 0.6-6	5.56	0.66
Üçgen ABS 0.6-6	3.55	0.25
Altıgen PETG 0.6-6	0.28	0.06
Altıgen HIPS 0.6-6	0.22	0.01
Altıgen ABS 0.6-6	1.2	0.02
Altıgen ABS 0.8-6	1.7	0.10
Altıgen ABS 1-6	1.06	0.07
Altıgen ABS 0.6-8	0.43	0.06
Altıgen ABS 0.6-10	0.08	0.003
Missing-rib ABS 0.6-6	0.64	0.02
Star ABS 0.6-6	1.14	0.1
Kiral ABS 0.6-6	0.13	-
Re-entrant PETG 0.6-6	0.73	0.19
Re-entrant HIPS 0.6-6	0.53	0.14
Re-entrant ABS 0.6-6	1.6	0.21
Re-entrant ABS 0.8-6	1.57	0.33
Re-entrant ABS 1-6	2.62	1.12
Re-entrant ABS 0.6-8	0.40	0.1
Re-entrant ABS 0.6-10	0.14	0.01

3.3. Sandviç Kompozit Malzeme Testleri

3.3.1. Basma Testleri

3.3.1.1. Düzlem Dışı Basma Testi

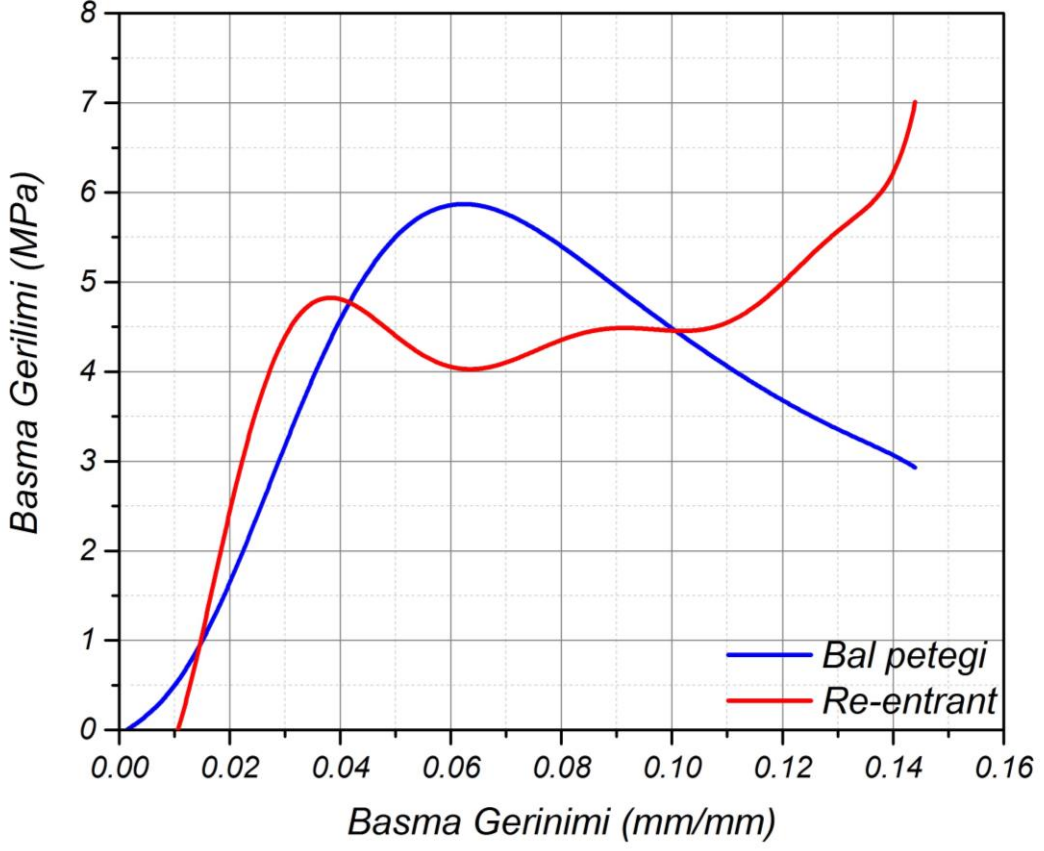
Karbon epoksi prepreg yüzey tabakası, 0.6 mm duvar kalınlığı ve 6 mm hücre uzunluğunda ABS hammaddesinden üretilen bal peteği ve re-entrant desenlerine sahip çekirdek malzemelerin kullanıldığı kompozit sandviç plakalara ait düzlem dışı basma testine ait gerilim/gerinim grafiği Şekil 15’ de verilmiştir. Düzlem dışı basma testi incelendiğinde bal peteği çekirdeğe sahip sandviç kompozitin 24 (MPa), re-entrant çekirdeğe sahip sandviç malzemenin ise 21 (MPa) basma gerilim değerine sahip olduğu gözlemlenmiş ve bu doğrultuda her iki desen tipindeki sandviç kompozit numunenin benzer gerilim değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.



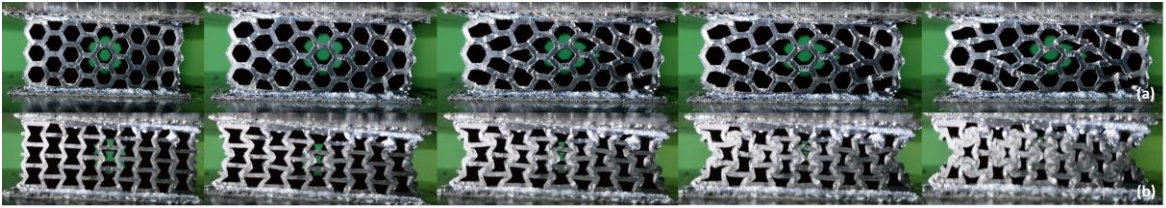
Şekil 3.15. Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlerin düzlem dışı basma gerilim/gerinim grafiği

3.3.1.2. Düzlem İçi Basma Testi

Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlere uygulanan basma test sonuçlarından elde edilen düzlem içi basma gerilim/gerinim grafiği Şekil 3.16 da verilmiştir. Bal peteği deseninde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit malzemelerde en yüksek basma gerilim/gerinim değeri 5.8 MPa iken re-entrant desenindeki çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit numunelerde ise en yüksek basma gerilim/gerinim değeri 4.7 MPa olarak gözlemlenmiştir. Şekil 3.17' den görülebileceği gibi öksetik(re-entrant) çekirdek malzemesine sahip sandviç kompozit malzemenin basma testi sırasında hücre boşluklarının öksetik davranış sonucu kapanmasından dolayı test süresince basma gerilim değerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 3.16. Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlerin düzlem içi basma gerilim/gerinim grafiği

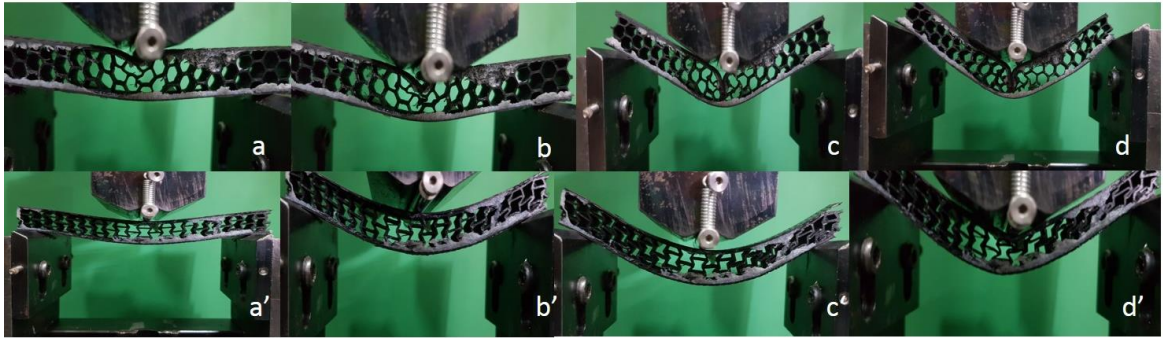
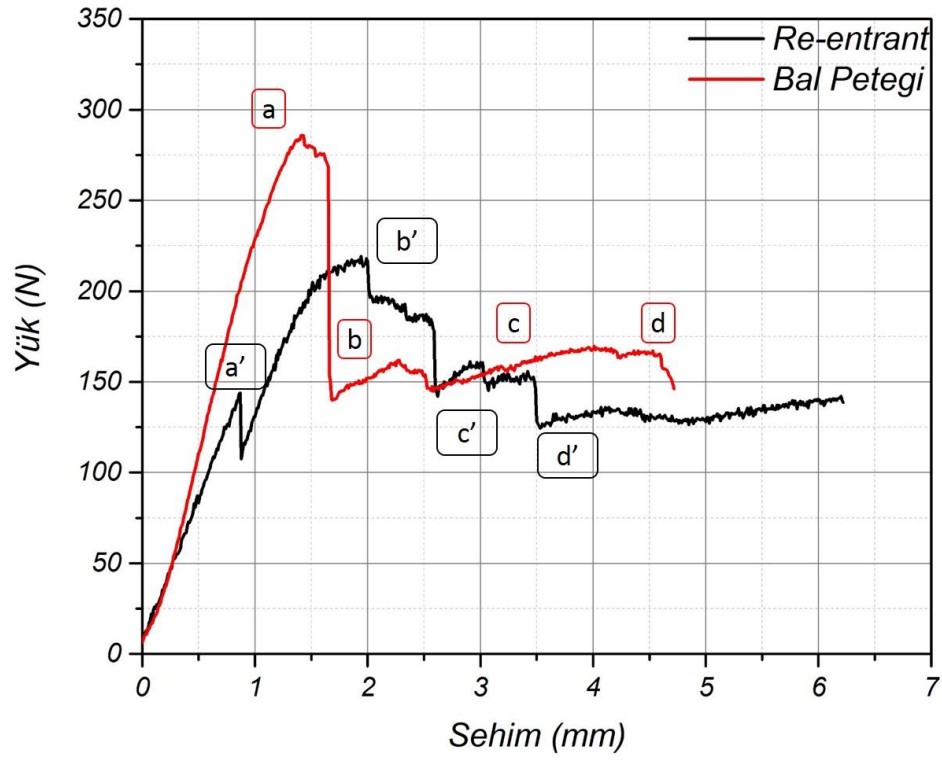


Şekil 3.17. Re-entrant ve bal peteği çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit malzemelerin basma testi sürecindeki deformasyonu

3.3.2. Üç Nokta Eğme Testi

Bal peteği ve re-entrant desenlerinde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozitlere uygulanan üç nokta eğme test sonuçlarından elde edilen yük/sehim grafiği Şekil 3.18' de verilmiştir. Bal peteği deseninde çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit malzemenin

re-entrant desenli çekirdek malzemeye sahip sandviç kompozit malzemedan daha yüksek maksimum yük(273 N) değeri gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca bal peteği desenindeki sandviç kompozit malzemelerin test sırasında karbon epoksi kompozit yüzey tabakaları kırıldıktan sonra taşıdıkları yük miktarının lokal deformasyon sebebiyle düştüğü ancak re-entrant desene sahip sandviç kompozitlerin ise yüzey tabakaları kırıldıktan sonra öksetik davranıştan dolayı taşıdığı yük miktarının arttığı gözlemlenmiştir. H. Yazdani Sarvestan, vd.[43] FDM tipi 3 boyutlu yazıcı kullanarak Isomax, Octet ve Cubic desende 3 farklı hücresel, re-entrant desende öksetik çekirdek malzemeleri üretmişler ve 3 nokta eğme testi yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada öksetik re-entrant desenindeki çekirdek malzemedan lokal deformasyon oluşmadığını ve en düşük yükü(1200N) taşıdığını bunun yanında hücresel desene sahip çekirdeklerin daha fazla yük taşıdığını en fazla yükü(4.8 MPa) ise Octet desendeki çekirdek malzemenin taşıdığını belirlemişler ayrıca hücresel desendeki çekirdek malzemelerde lokal deformasyonun gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. T. Li ve arkadaşları [42] 3 boyutlu yazıcı kullanarak truss, altıgen ve re-entrant çekirdek malzemeleri üretmiş ve bu çekirdekleri CFRP yüzey tabakaları ile birleştirerek sandviç kompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri sandviç kompozitlere 3 nokta eğme testi yapmışlar ve truss, altıgen ve re-entrant desenine sahip numunelerin taşıdıkları maksimum yükleri sırasıyla 657 MPa, 470 MPa ve 510 MPa bulmuşlardır.



Şekil 3.18. Sandviç kompozit eğme testi yük/sehim grafiği, test sırasında re-entrant ve bal peteği desene sahip numunelerde gözlemlenen deformasyonlar

4. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Hücresel desene sahip çekirdek malzemeler öksetik desene sahip çekirdek malzemeler göre daha yüksek düzlem içi ve düzlem dışı basma dayanımına sahiptir.
2. PLA filamentinden üretilen standart test numuneleri diğer hammadde türlerinden üretilen numunelere göre daha yüksek değerler gösterirken, PLA filamentinden üretilen çekirdek malzemeler diğer filament türlerinden üretilen çekirdek malzemelere göre en düşük düzlem içi ve dışı basma gerilim değerini göstermiştir.
3. Bal peteği deseni düzlem dışı basma testinde en yüksek düzlem içi basma testinde ise en düşük basma gerilim değerini göstermiştir.
4. Bal peteği ve re-entrant desene sahip çekirdek malzemelerin hücre duvar kalınlığının artması basma ve eğme dayanımını artmıştır.
5. Bal peteği ve re-entrant desene sahip çekirdek malzemelerin hücre duvar uzunluğunun artmasının basma ve eğme dayanımını azalttığı belirlenmiştir.
6. Re-entrant deseni bal peteği desenine göre hem düzlem içi hem de düzlem dışı basma testinde daha yüksek basma gerilim değeri göstermiştir.
7. Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzemeler FDM tipi 3 boyutlu yazıcılar kullanılarak üretilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Gibson L.J. ve Ashby M.F., Cellular Solids Structure and Properties, Second Edition Cambridge University Press, Cambridge,1999.
2. Schaedler T.A. ve Carter W.B., Architected Cellular Materials, Annual Review of Materials Research, 46, 1 (2016) 187-210.
3. Reis E.M. ve Rizkalla S.H., Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels, Construction and Build Materials, 22, 6 (2008) 1009-1018.
4. Akbarzadeh A.H. ve Fu J.W., Chen Z.T ve Qian L.F., Dynamic eigenstrain behavior of magnetoelastic functionally graded cellular cylinders, Composite Structures, 116, (2014) 404-413
5. Petras A. ve Sutcliffe M.P.F., Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. Composite Structure, 44, 4 (1999) 237–252.
6. Dinwiddie R.B., Dehoff R.R., Lloyd P.D., Lowe L.E. ve Ulrich J.B., Thermographic in-situ process monitoring of the electron-beam melting technology used in additive manufacturing, Spie Defence, Security, And Sensing, Mayıs 2013, Baltimore, Front Matter: 8705.
7. Roberts J.C., Boyle M.P., Wienhold P.D. ve White G.J., Buckling, collapse and failure analysis of FRP sandwich panels. Composite Part B:Engineering, 33, 4 (2002) 315-324.
8. Fam A., Sharaf T. ve Sadeghian P., Fiber Element Model of Sandwich Panels with Soft Cores and Composite Skins in Bending Considering Large Shear Deformations and Localized Skin Wrinkling, Journal of Engineering Mechanics, 142, 5 (2016)
9. Sadeghian P., Hristozov D. ve Wroblewski L., Experimental and analytical behavior of sandwich composite beams: Comparison of natural and synthetic materials, Journal Sandwich Structure Materials, 20, 3 (2018) 287-307.
10. Pimenta S, ve Pinho ST., Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, Waste Management, 31, 2 (2011) 378-392.
11. Han SH., Cho EJ., Lee HC., Jeong K. ve Kim SS., Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. Composite Structure, 119 (2015) 50-58.
12. Wulfsberg J., Herrmann A., Ziegmann G., Lonsdorfer G., Stöß N. ve Fette M., Combination of carbon fibre sheet moulding compound and prepreg compression moulding in aerospace industry, Procedia Engineering, 81, (2014) 1061-1607.

13. Verrey J., Wakeman M.D., Michaud V. ve Manson J.A.E., Manufacturing cost comparison of thermoplastic and thermoset RTM for an automotive floor pan, Composite Part A: Applied Science Manufacturing, 37, 1 (2006) 9-22.
14. Choi H.S. ve Jang Y.H., Bondline strength evaluation of cocure/precured honeycomb sandwich structures under aircraft hygro and repair environments, Compos Part A Applied Science Manufacturing, 41, 9 (2010) 1138-47.
15. Liu Y., Zwingmann B. ve Schlaich M., Carbon fiber reinforced polymer for cable structures-a review, Polymers, 7, 10 (2015) 2078-2099.
16. Wang YC., Wong PMH. ve Kodur V., An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures, Composite Structure, 80, 1 (2007) 131-140
17. Rocca SV. ve Antonio N., Mechanical characterization of sandwich structure comprised of glass fiber reinforced core, Composites in construction third international conference, July 2005, Lyon.
18. Vinson J.R., The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, New York, 2018.
19. Uzun M., Negative Poisson Ratio (Auxetic) Materials and Their Applications, Textiles and Engineers, 77, (2017).
20. Korkut S., Poisson Oranı Nedir?. <http://www.serdarkorkut.com/2017/05/26/poisson-orani-nedir> 25 Nisan 2019
21. Lakes R., Foam structures with a negative poisson's ratio, Science, 235, 4792 (1987) 1038-1040
22. Uzun M., Alderson A. ve Alderson K., Textile Applications of Auxetic Materials, 6 International Workshop on Auxetics and Related Systems, Ekim 2009.
23. Alderson A., A Triumph of Lateral Thought, Chemistry and Industry, (1999) 384-391
24. Love A. Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, Cambridge University Press, Cambridge, 1892.
25. Dunn M.L. ve Ledbetter H., Poisson's ratio of porous and microcracked solids: Theory and application to oxide superconductors, Journal of Materials Research, 10, 11 (1995) 2715-2722.
26. Veronda D.R. ve Westmann R.A., Mechanical characterization of skin-Finite deformations, Journal of Biomechanics, 3, 1 (1970) 111-122.

27. Williams J.L. ve Lewis J.L., Properties and an Anisotropic Model of Cancellous Bone From the Proximal Tibial Epiphysis. Journal of Biomechanics Engineering, 104, 1 (1982) 50-56 .
28. Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S. ve Robertson C.İ., The mechanics of two-dimensional cellular materials, Royal Society, 382, 1782 (1982).
29. Evans K.E., Donoghue J.P. ve Alderson K.L., The design, matching and manufacture of auxetic carbon fibre laminates, Journal of Composite Materials, 38, 2 (2004) 95-106.
30. Herakovich C.T., Composite Laminates with Negative Through-the-Thickness Poisson's Ratios. Journal of Composite Materials, 18, 5 (1984) 447-455.
31. Christensen J., Kadic M., Kraft O. ve Wegener M., Vibrant times for mechanical metamaterials. MRS Communications, 5, 3 (2015) 453-462.
32. Alderson A. ve Alderson K.L., Auxetic materials, Journal of Aerospace Engineering, 221, 4 (2007) 565-575.
33. Yang L., Harrysson O., West H. ve Cormier D., Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. International Journal of Solids and Structures, 69, 70 (2015) 475-490.
34. Masters I.G. ve Evans K.E., Models for the elastic deformation of honeycombs, Composite Structure, 35, 4 (1996) 403-422.
35. Grima J.N., Gatt R., Alderson A. ve Evans K.E., On the potential of connected stars as auxetic systems, Molecular Simulation, 31, 13 (2005) 925-935.
36. Prall D. ve Lakes R.S., Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of — 1, International Journal of Mechanical Sciences, 39, 3 (1997) 305-314.
37. Rossiter J., Takashima K., Scarpa F., Walters P. ve Mukai T., Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness, Smart Materials and Structures, 23, 4 (2014)
38. Pollard D., Ward C., Herrmann G. ve Etches J., The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 3, 1 (2017) 21-31.
39. Yap Y.L., Lai Y.M., Zhou H.F. ve Yeong W.Y., Compressive Strength of Thin-Walled Cellular Core by Inkjet-Based Additive Manufacturing, 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing, Singapore 2014, Bildiriler Kitabı 333-338.

40. Wang A.J., Kumar R.S. ve McDowell D.L., Mechanical behavior of extruded prismatic cellular metals. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 12, 3 (2005) 185-200.
41. Lu C., Qi M., Islam S., Chen P., Gao S. ve Xu Y., Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 5, 1 (2018) 47-54.
42. Li T. ve Wang L., Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, Composite Structure, 175, 1 (2017) 46–57.
43. Yazdani S.H., Akbarzadeh A.H., Mirbolghasemi A. ve Hermenean K., 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability, Material Design, 160, 15 (2018) 179-193.
44. Hou Y., Neville R., Scarpa F., Remillat C., Gu B. ve Ruzzene M., Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading, Composite Part B Engineering, 59 (2014) 33–42.

ÖZGEÇMİŞ

Kutay ÇAVA, 1993 yılında İstanbul'un Kadıköy ilçesinde doğdu. 2011 yılında Şenesenevler lisesinden mezun oldu. Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2016 yılında lisans öğrenimini tamamlamıştır. 2017 yılında K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2017-2019 yılları arasında sunulmuş olan 3 adet bildirisi bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

