



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALAT İLE
ÜRETİLEREK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda DENİZ KARA

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

KASIM 2022

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALAT İLE
ÜRETİLEREK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Seda DENİZ KARA
181212874013**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Şeyma DUMAN

KASIM 2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 181212874013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Seda DENİZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEREK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Şeyma DUMAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Didem OVALI DÖNDAŞ
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Teslim Tarihi : **21.11.2022**
Savunma Tarihi : **21.10.2022**



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

İNTİHAL BEYANI

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

Öğrencinin Adı Soyadı: Seda DENİZ KARA

İmzası :

X X X X



Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tez yönetimimi üstlenen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Şeyma DUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca attığım her adımda olduğu gibi yüksek lisans sürecimde de yanımda olan, her zaman destekleyen ve motive eden, beni olmaktan gurur duyduğum bir şekilde yetiştiren canım aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2022

Seda Deniz Kara
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ... ..	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Kompozit Malzemeler.....	3
2.1.1 Kompozit malzemelerin özellikleri.....	4
2.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	6
2.1.2.1 Metal matrisli kompozitler.....	6
2.1.2.2 Seramik matris kompozitler	7
2.1.2.3 Polimer matris kompozitler.....	8
2.1.2.4 Elyaf takviyeli kompozitler.....	13
2.1.2.5 Parçacık takviyeli kompozitler.....	14
2.1.2.6 Tabakalı kompozitler	14
2.1.2.7 Karma kompozitler	15
2.2 Sandviç Yapılı Kompozitler.....	16
2.2.1 Bal peteği yapılar	18
2.2.2 Oluklu yapılar	21
2.2.3 Köpük yapılar.....	22
2.2.4 Kafes yapılar	23
2.2.5 Öksetik (Auxetic) yapılar.....	25
2.3 Üç Boyutlu Yazıcılar.....	29
2.3.1 Üç boyutlu yazıcı çeşitleri.....	30
2.3.1.1 Ergiyik yığıma modelleme (Fused deposition modelling FDM)	30
2.3.1.2 Stereolitografi (SLA)	31
2.3.1.3 Seçici lazer sinterleme (SLS)	32
2.3.1.4 Polyjet	33
2.3.1.5 Tabakalı yapıştırırmalı parça imalatı (LOM)	34
2.3.1.6 Elektron ışınli ergitme (EBM)	35
2.3.2 Üç boyutlu yazıcıların uygulama alanları	35
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	38
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
4.1 Kullanılan Malzemeler	42
4.2 Numunelerin Tasarımı.....	43
4.3 Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi.....	45

4.3.1 Altıgen balpeteği çekirdek yapıya sahip malzemenin tasarımı.....	45
4.3.2 Çift ok kafa çekirdek yapıya sahip malzemelerin tasarımı	46
4.3.3 Tetrachiral çekirdek yapıya sahip malzemelerin tasarımı.....	47
4.4 Numunelerin Üretimi	49
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	52
5.1 Çekme Testi Sonuçları	52
5.2 Basma Testi Sonuçları.....	54
5.3 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	56
5.4 Darbe Test Sonuçları	57
5.5 Sertlik ve Yoğunluk Test Sonuçları	58
5.6 Yanmazlık Test Sonuçları	59
5.7 Sandviç Yapıların Basma Testi Sonuçları.....	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ.....	73



KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Butadien Stiren
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işınlı Ergitme)
EP	: Epoksi
FDM	: Fused Deposition Modelling (Ergiyik Yığma Modelleme)
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
HDPE	: Yüksek yoğunluklu Polietilen
HDT	: Isıl bozulma sıcaklığı
LDPE	: Düşük yoğunluklu Polietilen
LOM	: Laminated Object Manufacturing (Lamine Nesne Üretimi)
M.Ö.	: Milattan önce
PA	: Poliamid
PC	: Polikarbonat
PE	: Polietilen
PC/ABS	: Polikarbonat Butadien Stiren Alev Geciktirici
PLA	: Polilaktik Asit
PSU	: Polisülfon
SLA	: Stereolithography (Stereolitrografi)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
Stl	: Stereolithography (Standart Mozaikleme Dili)
UP	: Doymamış Polyester
3B	: Üç boyutlu

SEMBOLLER

dk	: Dakika
g/cm³	: Yoğunluk
GPa	: Gigapaskal
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
kJ/mm²	: Darbe dayanımı
m	: Metre
mm	: Milimetre
mm²	: Milimetre kare
MPa	: Megapaskal
°C	: Santigrat derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Termoplastiklerin spesifik özellikleri [24].	10
Çizelge 2.2 : Termosetlerin spesifik özellikleri [24].	12
Çizelge 4.1 : ABS malzemesinin mekanik özellikleri.	42
Çizelge 4.2 : Deneylerde kullanılan ABS filamentin genel özellikleri.	43
Çizelge 4.3 : PC/ABS malzemesine ait genel özellikler.....	43
Çizelge 4.4 : ABS malzemesine ait FDM yazıcı parametreleri.	49
Çizelge 4.5 : PC/ABS malzemesine ait FDM yazıcı parametreleri.....	50
Çizelge 5.1 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması.	53
Çizelge 5.2 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin basma testi sonuçlarının karşılaştırılması.	55
Çizelge 5.3 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin üç nokta eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması.	57
Çizelge 5.4 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin darbe testi sonuçlarının karşılaştırılması.	58
Çizelge 5.5 : ABS ve PC/ABS malzemelerine ait sertlik ve yoğunluk değerleri.	59
Çizelge 5.6 : UL-94 standardına göre yanma kriterleri.	59
Çizelge 5.7 : ABS ve PC/ABS kompozit sandviç numunelerinin üç nokta eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması.	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kompozit malzemenin temsili gösterimi [15].....	5
Şekil 2.2 : Geleneksel ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması [14].	6
Şekil 2.3 : Kimyasal reaksiyon sonucu termoset ve termoplastik yapısının temsili gösterimi [26].....	9
Şekil 2.4 : Takviye edici malzemeye kompozit malzemelerin sınıflandırılması [30]... ..	13
Şekil 2.5 : Fiber takviyeli kompozit ve bileşenlerinin şematik gösterilimi [31].....	13
Şekil 2.6 : Tabakalı kompozit yapısı [34].....	14
Şekil 2.7 : Karma kompozitlerin şematik gösterilimi [35].....	15
Şekil 2.8 : Sandviç kompozit yapısı [36].....	16
Şekil 2.9 : İnsan kemik yapısının ve sandviç kompozitin benzerliğinin temsili olarak gösterimi [37].....	17
Şekil 2.10 : Eğilme durumunda sandviç kompozitte oluşan yükler [38].....	17
Şekil 2.11 : Bal peteği sandviç kompozitlerin yapısı [41].....	19
Şekil 2.12 : Bal peteğinin geometrisi [41].....	19
Şekil 2.13 : Nomex, kevlar, alüminyum ve termoplastik bal petekleri [42].....	20
Şekil 2.14 : Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler A)Üçgen B)Trapezoidal C) Dörtgen D)Sinüzoidal [43].....	21
Şekil 2.15 : Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal c) Açık hücreli polimerik köpük d) Kapalı hücreli polimerik köpük [41].....	22
Şekil 2.16 : Farklı kafes çekirdek geometrilerinin şematik gösterilimi a) Tetrahedral b)Piramit c) Üç boyutlu Kagome [49].....	24
Şekil 2.17 : Tek hücreli kafes yapıların geometrileri a) Piramit kafes b) Tetrahedral kafes [49].....	25
Şekil 2.18 : Negatif ve pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin tek yönlü çekme kuvvetine göre davranışları a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme b) Negatif Poisson oranına sahip malzeme [52].....	26
Şekil 2.19 : Milton-Ashby öksetik malzemelerin haritası [55].....	27
Şekil 2.20 : Metamalzemelerin şeklini oluşturan geometriler [58].....	27
Şekil 2.21 : Yeniden kırıli yapı ve öksetik davranış [59].....	28
Şekil 2.22 : Kiral modelinin şematik gösterimi [58].....	28
Şekil 2.23 : a) Hexachiral ve b) Tetrachiral öksetik yapılarının geometrilerinin şematik gösterimi [60].....	29
Şekil 2.24 : Üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi [62].....	30
Şekil 2.25 : Ergiyik yığıma modelleme çalışma prensibi [64].....	31
Şekil 2.26 : Stereolografı çalışma prensibi [65].....	32
Şekil 2.27 : Seçici lazer sinterleme çalışma prensibi [65].....	33
Şekil 2.28 : Polyjet çalışma prensibi [65].....	33
Şekil 2.29 : Tabakalı yapıştırırmalı parça imalatı çalışma prensibi [65].....	34

Şekil 2.30 : Elektron ışınli ergitme çalışma prensibi [69].....	35
Şekil 2.31 : Porshce'nin üç boyutlu yazıcı ile ürettiği piston örnekleri [70].....	36
Şekil 2.32 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kalp [71].....	36
Şekil 2.33 : Üç boyutlu yazıcı ile basılmış bir diş modeli [72].....	37
Şekil 2.34 : Üç boyutlu yazıcı ile basılmış mühendislik malzeme örnekleri [73].....	37
Şekil 4.1 : Mekanik deneylerde kullanılan malzemelerin teknik resimlerin a) çekme b) basma c) üç nokta eğilme d) darbe e) yanma test numuneleri ölçümleri....	44
Şekil 4.2 : Mekanik deneylerde kullanılan malzemelerin a) çekme b) basma c) üç nokta eğilme d) darbe e) yanma test numunelerinin Solidworks tasarımları....	44
Şekil 4.3 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numenin Solidworks tasarımı.....	46
Şekil 4.4 : ASTM C393/C 393M-16 standardına göre tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numenin Solidworks tasarımı.....	46
Şekil 4.5 : Çift ok kafa çekirdek geometrisine ait hücre ölçüleri [41].....	46
Şekil 4.6 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.....	47
Şekil 4.7 : ASTM C393/C393M-16 standardına göre tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.....	47
Şekil 4.8 : Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip hücrelerin ölçümleri [41].....	48
Şekil 4.9 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.....	48
Şekil 4.10 : ASTM C393/C393M-16 standardına göre tasarlanan tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.....	48
Şekil 4.11 : Numunelerin üretiminin gerçekleştirildiği FDM yazıcı görseli [89].....	49
Şekil 4.12 : Numunelerin baskı aşamasının görseli.....	50
Şekil 4.13 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	50
Şekil 4.14 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	51
Şekil 4.15 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral yapıya sahip sandviç test numuneleri.....	51
Şekil 5.1 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait çekme test grafiği.....	52
Şekil 5.2 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait çekme test grafiği.....	53
Şekil 5.3 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait basma test grafiği.....	54
Şekil 5.4 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait basma test grafiği.....	55
Şekil 5.5 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait üç nokta eğme test grafiği...	56
Şekil 5.6 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait üç nokta eğme test grafiği.....	56
Şekil 5.7 : ABS ve PC/ABS malzemelere ait kırılma görseli.....	57
Şekil 5.8 : ABS ve PC/ABS malzemelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri.....	58
Şekil 5.9 : ABS ve PC/ABS malzemelerine uygulanan UL-94 yanma test aşaması [95].....	59
Şekil 5.10 : Sandviç yapılara ait basma test grafiği.....	60

POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEREK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Yüksek mukavemet, yüksek darbe dayanımı ve düşük yoğunluğun önem arz ettiği günümüz mühendislik malzemelerinde sandviç kompozit yapılar oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Gelişen üç boyutlu yazıcı teknolojisi özellikle karmaşık şekilli mühendislik malzemelerinin üretiminde zor ve uzun proses basamaklarına sahip geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaya başlamışlardır. Yapılan bu tez çalışmasında ticari akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve ticari polikarbonat akrilonitril bütadien stiren alev geciktirici (PC/ABS) filamentleri ile düz plaka numuneler FDM yazıcıda basılmış olup mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen çekme testi sonucuna göre ABS ve PC/ABS malzemelerine ait maksimum gerilmenin sırasıyla 27,79 MPa ve 29,09 MPa olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Darbe testi sonuçlarına göre ABS ve PC/ABS malzemelerine ait absorbe edilen enerji sırasıyla % 17,69 ve %32,70 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen verilere göre kompozit yapının darbe dayanımının ve absorbe ettiği enerjinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ticari olarak temin edilen ABS ve PC/ABS filamentlerinin mekanik özelliklerine kıyasla elde edilen sandviç numunelerin mekanik özelliklerinin daha düşük olduğu sonucu elde edilmiş olup yazıcı parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin olacağı öngörülmüştür. Üç boyutlu yazıcıların kullanım alanlarının artmasıyla negatif Poisson oranına sahip malzemeler üzerine de çalışmalar arttığı bilinmektedir. Malzemelerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde etken olan Poisson oranı genelde 0,3 civarındadır. Negatif Poisson oranına sahip öksetik yapıların pozitif Poisson oranına sahip malzemelere kıyasla daha yüksek enerji sönümleme gibi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında aynı zamanda ABS ve PC/ABS malzemelerden elde edilen geleneksel balpeteği çekirdek yapı sandviç kompozit yapı ile öksetik yapıya sahip çift ok kafa ve tetrachiral çekirdek geometrilerine sahip basma ve darbe test numuneleri FDM ile üretilerek mekanik özellikleri incelemeyi amaçlamıştır. Tetrakiral geometrik yapının hem ABS hem de PC/ABS kompozit sandviç numuneler için sırasıyla 3106,23 N ve 3312,70 N'luk maksimum kuvvete ulaştıkları görülmüştür.

Anahtar kelimeler: ABS, PC/ABS, Üç boyutlu yazıcı, Öksetik, Sandviç yapı.

DEVELOPING THE PROPERTIES OF POLYMER BASED COMPOSITES MATERIALS BY MANUFACTURING WITH ADDITIVE MANUFACTURING

SUMMARY

Sandwich composite structures are widely used in engineering materials where high strength, high impact probability and low density are important. Developing 3D printing technology has started to replace traditional production methods, especially complex shaped engineering materials which are difficult to product and have long process steps. In this thesis study flat plate sandwich samples were printed on FDM printer with commercial acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and commercial polycarbonate acrylonitrile butadiene styrene flame retardant (PC/ABS) filaments and they preserve their mechanical properties. According to the tensile test results, the values of the maximum stress for ABS and PC/ABS materials were 29,09 MPa and 27,79 MPa respectively. According to the impact test protections, the absorbed energy of ABS and PC/ABS materials was reached at a rate of %17,69 and %32,70, respectively. According to the results, structures with higher impact defense and absorbing energy of composite partitions have been achieved. Compared to the mechanical properties of commercially available ABS and PC/ABS filaments, the mechanical structure of the sandwich samples obtained was lower and the mechanical parts of the printer systems were predicted to come. It is known that three-dimensional printers are also used on products with negative Poisson ratio. The Poisson ratio, which is effective in determining the properties of materials, is usually around 0,3. The auxetic assumption with negative Poisson ratio is known to have mechanical automation, such as higher energy dissipation, compared to tests with positive Poisson ratio. In this thesis study, it was also aimed to examine the mechanical properties of compression and impact test specimens with traditional honeycomb core structure sandwich composite structure obtained as a result of ABS and PC/ABS, with double arrow head and tetrachiral core geometries with auxetic structure by FDM. It was observed that tetrachiral sucture reached the maximum force of ABS and PC/ABS 3106,23 N and 3312,70 N respectively.

Keywords: ABS, PC/ABS, 3D printer, Auxetic, Sandwich structure.

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanoğlunun değişen ihtiyaçlarının karşılanması için bilim ve teknoloji alanında sürekli olarak ilerleme yaşanmıştır ve yaşanmaya devam edecektir. İlerlemenin malzemeye bağlı olması ve geleneksel malzemelerin hem doğada kısıtlı olması hem de teknolojik gelişmelerin gereksinimlerini karşılamada tek başına yeterli olmaması kompozit malzemelerin geliştirilmesi için itici güç oluşturmuştur [1].

Kompozit malzemeler yapısı ve özelliği birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerini bir araya getirmek veya ortaya farklı bir özellik çıkarmak amacıyla makro veya mikro boyutta birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Uygulama alanına bağlı olarak gerekli olan spesifik özellikleri tek başına sağlayamayan malzemelerin uygun özelliklerinden yararlanmak üzere birleştirilerek elde edilen kompozit malzemeler, birleşen malzemelerin yekpare olarak sergileyemedikleri özellikleri kompozit halde karşılayabilmektedirler [2]. Kompozit malzemeler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, esneklik, yüksek darbe mukavemeti gibi özelliklerden dolayı havacılık, otomotiv, endüstri gibi uygulama alanlarında geleneksel malzemelere kıyasla daha çok tercih edilmektedir [3].

Matriks ve takviye fazından oluşan kompozit malzemelerde sürekli yapıya sahip matriks malzeme süreksiz yapıya sahip takviye elemanları için taşıyıcı faz görevini görmektedir. Kompozit malzemeler için genel bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Matriks malzemeye, takviye malzemeye, takviye elemanının şekil ve matriks içindeki dağılımına göre birden fazla sınıflandırma çeşidi bulunmaktadır. Uygulama alanına bağlı olarak matriks yapısına göre kompozit malzemeler polimer matriksli, metal matriksli ve seramik matriksli olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar. Kompozit malzemeler içerisinde polimer matriksli kompozitler sahip oldukları düşük yoğunluk, kolay preslenebilirlik, ucuz olması, kimyasallara karşı direnç gibi özelliklerinden dolayı oldukça yaygın kullanım alanına sahiptirler [3,4].

Takviye malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında yer alan tabakalı kompozitler en eski ve yaygın kullanım alanına sahip kompozit malzemelerdir. Tabakalı kompozitler geometrilerininin sağlamış olduğu yüksek mukavemet, sertlik ve hafifliğin yanı sıra uygulama alanının gereksinimine ve takviye malzemesine göre elektrik iletkenliği, ısı yalıtımı, aşınmaya karşı direnç, titreşim sönümleme, ısı ve neme dayanım gibi özellikler sağladığından dolayı özellikle uzay ve hava araçlarında, deniz araçlarında, otomotiv sanayinde geniş ve önemli bir kullanım alanına sahiptir. Tabakalı kompozitlerin özel türü olan sandviç kompozit yapılar tipik olarak iki adet ince, sert ve güçlü yüzeyin nispeten daha zayıf ve kalın çekirdeğe eklenmesiyle oluşmaktadır. Kullanılan çekirdek malzemesine ve yüzey tabaka malzemesine göre farklı tasarımlarda ve uygulama alanlarına göre sandviç kompozitler üretilmektedir. Düşük ağırlık ve yüksek mukavemet istenilen uygulamalarda kullanılabilen sandviç kompozit malzemelerde çekirdek malzeme basma ve kayma gerilimlerine dirençlik gösterirken dış yüzeyler çekme ve basma gerilimlerine karşı direnç göstermektedir [5].

Gelişen teknoloji ile malzemelerin üretim yöntemleri de gelişmiştir. Uzun işlem süreleri, birden fazla işlem gereksinimi, hurda ve atık fazlalığı ve çevresel etkilerden kaynaklı yasal yükümlülüklerden sebebiyle geleneksel üretim yöntemlerinden ekmeli imalat gibi alternatif üretim yöntemlerinin arayışına geçilmiştir. Günümüzde üç boyutlu yazıcılar olarak da adlandırılan eklemeli imalat teknolojileri hızlı prototipleme yöntemlerine dikkaç çekmektedir. 3B yazıcılarda kullanılan Fused Deposition Modelling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Electron Beam Melting (EBM) gibi farklı yöntemler sayesinde polimer, metal, seramik, kompozit gibi pek çok malzeme ile üretim yapılabilmektedir. Özellikle kompleks parçaların üretimini ve tamiratını kolaylaştıran 3B yazıcılar otomotiv, havacılık, savunma sanayi, biyomühendislik, mühendislik ve mimarlık, gıda, inşaat gibi çoğu sektörde kullanılmaktadır [4]. Bu tez çalışmasında üç boyutlu yazıcıda Akrilonitril bütadien stiren ve polikarbonat akrilonitril bütadien stiren alev geciktirici malzemeleri kullanılarak düz plaka numuneleri ile balpeteği, çift ok kafa ve tetrachiral çekirdek geometrilerine sahip sandviç yapı polimer kompozitler üretilmiştir. Üretilen düz plaka numunelere ve sandviç yapılara farklı mekanik testler yapılmış ve bu testlerin sonucuna göre kullanılan malzemeler karşılaştırılmış ve yorumlar yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Kompozit Malzemeler

Uluslar arasındaki teknoloji rekabetinin amacı insanoğlunun yararına daha iyi bir yaşam standardı yaratmaktır. Değişen yaşam standardının gereksinimlerini karşılayabilmek ve teknoloji alanında üstünlük elde etmek için insanoğlu sürekli olarak yeni malzeme, tasarım ve teknoloji ürünlerinin arayışı içersinde olmaktadır. Gelişmiş veya teknolojik ürünlerde malzeme seçimi malzemenin kullanılabilirliğine, performansına, bulunabilirliğine, maliyetine bağlı olduğundan ve gelişen teknoloji gereksinimlerinin geleneksel malzemeler tarafından tek başına sağlanamadığından dolayı kompozit malzemeler geleneksel malzemelere alternatif olmaktadır [7]. Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı metal, seramik ve polimer gibi geleneksel malzemelerin yerini almıştır. Günümüzde kompozit malzemeler, mobilya, ulaşım, eğitim, spor, eğlence gibi oldukça yaygın kullanım alanına sahiptirler [8].

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek bir malzemede birleştirmek amacıyla üretilen malzemelerdir. Kompozit malzemeler dayanıklı, esnek ancak yeterli mekanik özelliklere sahip olmayan matriks ile yüksek mekanik dayanımlı takviye edici malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulur. Takviye edici malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini arttırırken, matriks malzeme deformasyona neden olabilecek çatlak ilerlemesini engeller ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir [9].

Kompozit malzemeler insanlık tarafından keşfedilmemiş olup doğada örnekleri bulunmaktadır. Doğal yapıştırıcı olan ligninin selüloz fiberler ile meydana getirdiği odun, istiridye kabuğu doğadaki kompozit malzemelere örnek verilebilmektedir [10]. İnsanlık tarafından kompozit malzemelerin kullanımı bambu ile takviye edilerek sağlamlaştırılmış çamur duvar, çam reçinesiyle birleştirilmiş bambudan yay gibi malzeme örnekleri ile M.Ö. 1500'lü yıllara dayanmaktadır. 1930'lu yıllarda kimya

alanındaki gelişmeler ile sentetik polimerler insanlık hayatına girmiştir. Bu malzemeler metallere kıyasla daha hafif olmaları, yüksek korozyon direnci gibi özelliklere rağmen metaller kadar mukavemet ve sertlik göstermediğinden dolayı çok tercih edilen malzemeler olmamıştır [11].

II. Dünya Savaşı sırasında yaşanan metalik malzeme kıtlığı, alternatif malzeme arayışına sebep olarak kompozit malzemelerin özellikle de polimer kompozitlerin gelişmesine neden olmuştur. Yaşanılan malzeme kıtlığı nedeniyle konut ve taşıtların karoserlerinde fiber katkılı polimer malzemelerin (FRP) kullanımı artmıştır. 1950 yıllarında FRP malzemelerin popüler olduğunda, cam elyaf ile güçlendirilmiş polyester reçineler sıvı tankları, çatı levhaları, deniz tekneleri gibi ürünlerin imalatında kullanılmıştır. 1970 yıllarında cam elyaflar polipropilen poliamid gibi termoplastik polimerlerle enjeksiyon proseslerinde kullanıldı sert ve dayanıklı parçalar elde edildi. Sürekli araştırmalar ve malzemelerin geliştirilmesiyle elde edilen kompozitler günümüzde spordan otomotiv parçalarına birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır [11, 12].

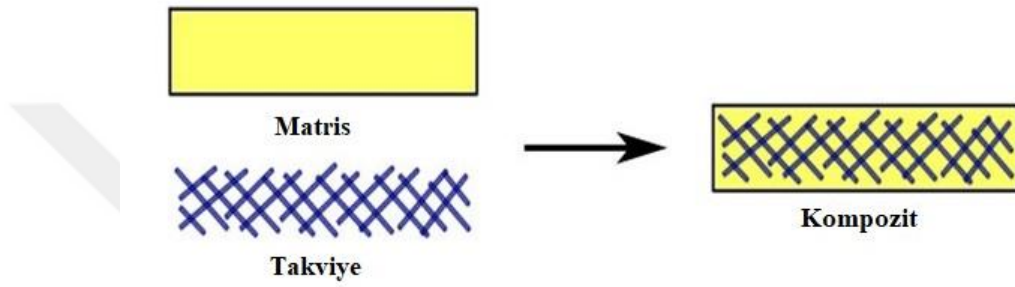
2000’li yıllara kadar otomotiv, konstrüksiyon, savunma, uzay, spor gibi birçok uygulama alanında yaygınca kullanılan sentetik polimer kompozit malzemeler; küresel ısınma, çevre bilincinin artması, atık alanlarının kıtlığı, fosil kaynaklarının giderek azalması ve artan petrol fiyatları gibi sebeplerden dolayı “Yeşil kompozitler” adıyla adlandırılan biyobazlı/biyobozunur malzemelerden elde edilen kompozitlerin geliştirilmesine teşvik etmiştir [13, 14].

Kompozit malzemeler çocuk oyuncaklarından uçak gövdesine kadar çeşitli endüstrilerde uygulanmaları nedeniyle günümüz malzemeleri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte gelecekte nanokompozitler ve akıllı malzeme gibi alanlarda sunabilecekleri potansiyel uygulamalardan dolayı yarının malzemesi olarak da değerlendirilebilmektedir [11].

2.1.1 Kompozit malzemelerin özellikleri

Bir malzemenin kompozit olarak adlandırılabilmesi için; takviye elemanın malzeme içindeki ağırlıkça yüzdesinin %10’dan büyük olması, takviye elemanın özelliğinin başka bir bileşenin özelliğinden beş kat daha büyük olması, takviye elemanı ve matrisin malzemeye önemli bir katkı sağlaması gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir [12].

Takviye elemanı ve matris çiftinden oluşan kompozitlerin elde edilmesinde bileşenlerin özellikleri dikkate alınmalıdır. Kompozit malzemelerde matris; takviye elemanına göre daha yumuşak ve düşük mukavemete sahiptir. Kompozit malzemeye şeklini veren matris yapısı tokluk görevini üstlenerek takviye elemanlarını fiziksel ve çevresel etkilerden korumaktadır. Takviye elemanı ise kompozit malzemeye mukavemet, sertlik kazandırarak, takviye elemanının özelliğine göre kompozit malzemeye iletkenlik, taşıyım gibi mekanik özellikler sağlamaktadır. Şekil 2.1'de kompozit malzeme temsili olarak verilmiştir.



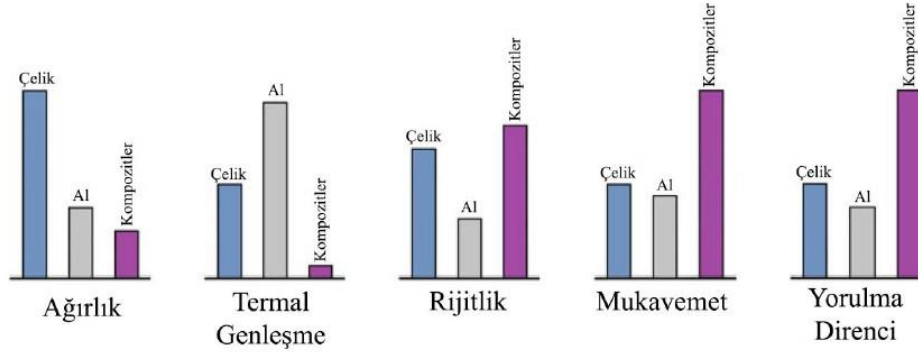
Şekil 2.1 : Kompozit malzemenin temsili gösterimi [15].

Uygun matris/takviye elemanı seçimi kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etki edeceğinden son derecede önem arz etmektedir. Heterojen sistem olan kompozit malzemelerde matris ve takviye elemanın birleştiği bölgelerde ara yüzey bağı oluşmaktadır.

Ara yüzey bağının oluşması matris ve takviye elemanının uyumuna ve matrisin ıslatılabilirlik özelliğine bağlı olmaktadır. Ara yüzey bağı kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir ve ayrıca kompozit malzemenin çatlak ilerlemesinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Eğer matrisin kayma modülü ve mukavemeti ve matris takviye elemanı ara yüzey bağı çok yüksek ise çatlak kompozit malzemede takviye elemanı ve matris üzerinde dönmeden doğrudan ilerleyerek kompozit malzemenin kırılgan bir malzeme gibi davranmasına sebep olabilmektedir. Arayüzey bağının çok düşük olması durumunda ise matris malzeme fiber demeti gibi rol oynayarak kompozit malzemeyi zayıflatmaktadır [13].

Matris/takviye elemanı seçimi mühendislik tasarımlarında büyük bir esneklik kazandırmıştır. Uygulama alanına bağlı değişen talepler doğrultusunda mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme tasarımında aynı zamanda malzeme ağırlığından ve maliyetinden de tasarruf edilebilmektedir.

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre avantajlarından bazıları, hafiflik, optimum sertlik, mukavemet, yüksek korozyon direnci, düşük maliyetli, düşük termal iletkenlik olarak değerlendirilebilmektedir. Şekil 2.2’de geleneksel monolitik malzemelerin kompozit malzemeler ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.2 : Geleneksel ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması [14].

Kompozit malzemelerin dezavantajları üretim güçlüğü, üretiminin pahalı olması, işlenmesinin güç olması ve geri dönüşüme elverişli olmaması sayılabilmektedir [14].

2.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında birçok sınıflandırma olup standart bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Sınıflandırma genellikle matris yapılarına göre veya takviye edici malzemelerin şekillerine, yerleştirilmelerine göre yapılmaktadır.

Matris yapılarına göre kompozitler metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer kompozitler olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Takviye edici elemanın şekli ve yerleşimine göre kompozitler dörde ayrılmaktadır. Bu bölümde sırasıyla matris yapılarına göre sınıflandırma ve takviye edici elemanlara göre sınıflandırmanın açıklanması hedeflenmiştir.

2.1.2.1 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, metal veya metal alaşım olan matris yapı ile metalik yada seramik takviye edici elemanlardan oluşmaktadır [16]. Metal malzemeler plastik malzemelere kıyasla daha yüksek Elastisite modülü, mukavemet ve tokluğu sahip malzemelerdir. Aynı zamanda metallerin ergime sıcaklıkları polimer malzemelere

kıyasla daha yüksektir. Sahip olduğu bu ve benzeri özelliklerden dolayı metal matris kompozit malzemeler, yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren veya yükün önemli olduğu uygulamalar için öncelikli malzemelerdir.

Metallerin nispeten yüksek yoğunluğa sahip olmaları ve kolayca korozyona uğramaları gibi dezavantajları bulunmaktadır. Takviye edici elemanın spesifik özelliklerine göre metal matrisin özgül mukavemeti, aşınma direnci, termal iletkenliği gibi uygulama alanının gerekliliklerine göre arttırılmaktadır [17].

Metallerin yüksek ergime sıcaklığına sahip olmaları kompozit malzeme üretiminde ergime yüksek ergime sıcaklığı gerektiğinden ve metallerin her takviye edici elemanla ara yüzey bağı oluşturmadağından metal matris kompozitlerin üretimi zor ve pahalı olmaktadır [17, 18]. Alüminyum (Al), Titanyum (Ti), Bakır (Cu) ve Magnezyum (Mg) malzemeleri sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek tokluk ve iyi mekanik özellikler sebebiyle en yaygın kullanılan metal matris malzemeleri olmaktadır. Bu malzemelerin alaşım halleri de metal matrisli kompozitler için oldukça tercih edilmektedir.

Havacılık ve otomotiv sektöründe oldukça tercih edilen alüminyum veya alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitler, kolay işlenebilen, yüksek çekme mukavemetine sahip, aşınma ve termal bozulmaya karşı dayanıklı malzemelerdir. Uygulama alanın gerekliliklerine bağılı olarak bu malzemeler genellikle silisyum karbür (SiC), titanyum borür (TiB₂), bor karbür (B₄C), alüminyum oksit (Al₂O₃) gibi değişik takviye edici elemanlar kullanılmaktadır [19].

2.1.2.2 Seramik matris kompozitler

Düşük yoğunluklu olması ile tercih edilen polimer matris kompozitler düşük ergime sıcaklıklarından dolayı özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilemezken, seramik malzemeler bu uygulamalar için yüksek yoğunluklu metal malzemelere alternatif olmaktadır [20].

Seramik malzemeler düşük yoğunluklu, termal şok direnci, yüksek korozyon ve erozyon direnci, yüksek sertliğe sahip malzemelerdir. Göstermiş oldukları yüksek oksidasyon dirençlerinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamaları için elverişli olan seramik malzemelerin kırılğanlığı bu malzemelerin uygulama alanlarını kısıtlamaktadır.

Kırılğanlık nedeniyle güvensiz olan yekpare seramik malzemeler uygun takviye edici

elemanlar ile elde edilen kompozit yapılarla kullanımı arttırılmaya çalışılmaktadır. En yaygın kullanılan seramik matris yapıları, alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum nitrür (Si_3N_4), silisyum karbür (SiC), titanyum diborür (TiB_2) gibi örnekler verilebilmektedir. Takviye edici malzemelere alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum diborür (TiB_2), zirkonyum nitrür (ZrN) gibi örnekler verilebilmektedir [21].

Seramik matrisli kompozitlerin uygulama örnekler aşağıda belirtilmektedir.

Uzay ve havacılık; rulmanlar, türbin bileşenleri ve motorları, ısı kalkanları, termal koruma sistemleri verilebilir. Otomotiv uygulamaları; yakıt enjeksiyon parçaları, dizel motorlar, katalitik konvertörler, vanalar verilebilir. Biyomalzeme uygulamaları; yapay dişler, iskelet sisteminin yapay parçaları, yapay kalp kapakçığı. Metalurji uygulamaları; potalar, kesme sistemleri, ısı eşanjörleri, ısıtım fırınları, yüksek sıcaklıklarda çalışacak ekipmanlar, brülörler verilebilir. Askeri uygulamaları; denizaltılar, helikopterler, roket ve uçak bileşenleri, roket nozülleri verilebilir. Kimya uygulamaları; katalizörler, radyasyon, ısı geri kazanım üniteleri, reaktörler örnek verilebilir [22, 23].

2.1.2.3 Polimer matris kompozitler

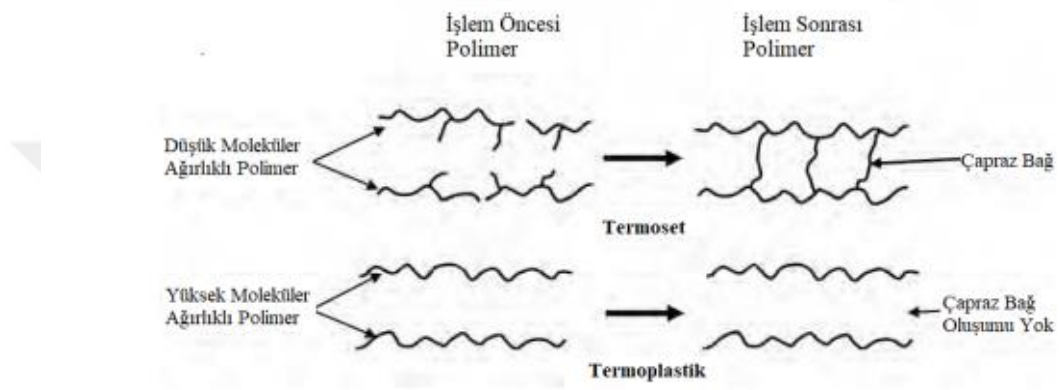
Düşük yoğunluğa sahip olma, kolay işlenebilme, hammaddelerin ucuz olması ve üretimlerin ucuz ve kolay olması gibi özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler arasında en çok tercih edilen polimer kompozit malzemeler olmaktadır. Polimer kompozit malzemelerde matris yapıyı termoset ve termoplastik reçineler oluştururken, takviye edici malzemeleri cam, karbon, grafit, aramid gibi fiberlerden oluşmaktadır.

Takviye edicilerin yada fiberlerin polimer matrise gömülmesiyle elde edilen polimer kompozit malzemelerin üretim yöntemleri diğer kompozit malzemelere daha kolaydır. Uygun takviye edici malzeme ve matrise bağlı olarak polimer kompozitler yüksek kırılma direnci, yüksek çatlama direnci, yüksek tokluk, yüksek darbe direnci, yüksek korozyon direnci gibi özelliklerin yanı sıra oldukça hafif ve diğer kompozitlere kıyasla daha ucuz olduğundan kompozit malzemeler arasında en çok tercih edilen kompozit türün, oluşturmaktadır. Bu avantajlar sayesinde özellikle otomotiv, uçak deniz ve enerji uygulamalarında oldukça tercih edilmektedir [24].

Polimer kompozit malzemelerde matris yapı takviye edicileri bağlayıcı olarak bir arada tutar ve hem kompozitin üretimi esnasında hem de nihai kullanımda uygulanan yük altında takviye edicileri çevreden korumaktadır. Matris yapı kompozit malzeme

yapısının maksimum kullanım sıcaklık, kimyasal kararlılık, tokluk ve darbe mukavemeti, korozyon direnci, gibi özelliklerin belirlenmesinde matris yapı önemli bir rol oynamaktadır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris yapıyı oluşturan polimerler kendilerini tekrarlayan monomerlerin sentezlenmesiyle oluşan bağ yapısına göre termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılmaktadır [25]. Şekil 2.3’de kimyasal reaksiyon sonucu oluşan termoplastik ve termoset şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2.3 : Kimyasal reaksiyon sonucu termoset ve termoplastik yapısının temsili gösterimi [26].

Termoplastikler yüksek molekül ağırlığına sahip, işlem sırasında çapraz bağ oluşturmayan, ısı ile yumuşama gösterip kolayca istenilen şekli alabilen, çapraz bağ içermemesi ile ısı ve basınç ile tekrar şekillendirilebildiğinden dolayı yüksek geri dönüşüm kapasitesine sahip, yüksek tokluk, uzun raf ömrüne sahip reçinelerdir. Termoplastiklerin nispeten yüksek vizkoziteye sahip olmaları, yüksek ısıl genleşme değerlerinden dolayı matris ve fiber takviye edici eleman arasında bir uyumsuzluk yaratabilme ihtimali ve çevresel etkenlerden kolayca etkilenebilmektedirler. Bu durum birçok termoplastik malzemenin olmasına rağmen kompozit için sınırlı termoplastiklerin olmasına sebep olmaktadır [27, 28]. Çizelge 2.1 yaygın kullanılan termoplastik malzemeler ve spesifik özellikleri çizelge göstermektedir.

Çizelge 2.1 : Termoplastiklerin spesifik özellikleri [24].

Reçine	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	HDT (°C)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
ABS	0.88-3.5	24.1-73.1	0.78-6.1	65-220	105-109
PS	1.02-1.18	17.9-60.7	0.3-3.35	62-98	83-100
PA6	1.12-1.14	41-166	2.6-3.2	68-85	47
PC	0.95-1.51	46.1-93.1	1.8-3.0	78-187	143-152
PSU	1.37-1.48	60-131	-	172-213	-
PE	0.94-1.53	11-113	0.7-13.6	51.7-127	-

Polietilen (PE); birçok ürün için gerekli mukavemet, kolay şekil alma, mükemmel korozyon direnci, düşük maliyet özelliklerine sahip yarı saydam termoplastiklerdir. Zincir yapılarına bağlı olarak yüksek yoğunluklu (HDPE) ve düşük yoğunluklu (LDPE) olmak üzere iki tür polietilen bulunmaktadır. Elektrik yalıtım malzemeleri, ev eşyaları, ambalaj, kimyasal borularda yaygınca kullanılmaktadırlar [24, 29].

Polistiren (PS); şeffaf, kokusuz ve diğer plastiklere nispeten daha kırılğan termoplastik malzemedir. Polistirenin darbe özellikleri polibütadien kauçuk ile polimerizasyon ile geliştirilebilmektedir. İyi boyutsal stabiliyeti ve düşük sertleşme büzüşmesine sahiptirler ancak organik çözücü ve yağlara karşı hassastırlar. Oyuncak, gıda, ambalaj uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Poliamid (PA); tekrarlanan amid grubunun oluşturduğu zincir yapılarıyla naylon olarak da isimlendirilen poliamidler mühendislik plastiklerin en önemli plastik malzemelerindendir. Farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip poliamid6, poliamid66, poliamid11 gibi çeşitleri bulunmaktadır. Cam, karbon gibi elyaflarla takviye edilerek elde edilen bu polimerlerin kompozit halleri kendi kendini yağlama özelliğinden dolayı düşük sürtünmenin var olduğu hareketli parçalarda, dişlilerde, cam silecek dişlileri, eğlence sektörü, ambalaj uygulamalarında oldukça tercih edilmektedir.

Poliamid malzemeler grubunun en önemli üyesi olan aramid kompozitler için oldukça önem arz etmektedir. Endüstriyel uygulamalarda Kevlar olarak da adlandırılan bu malzemenin mukavemeti ile çelik ile eşdeğerlik göstermesine rağmen yoğunluğu çelik malzemeye göre %20 daha düşük olmaktadır. Özellikle yüksek performans gerektiren parça üretiminde ve askeri uygulamalarda zırh yapımında tercih edilen malzemedir.

Poliamid malzemelerin en önemli dezavantajı nem tutmalarından kaynaklı mekanik ve fiziksel özelliklerinin olumsuz etkilenmesidir [24, 25].

Polikarbonat (PC); yapılarında karbonat grubu bulunan bir diğer termoplastik grubunu oluşturmaktadırlar. Oda sıcaklıklarında gerilme mukavemeti ve darbe mukavemeti kısmen yüksektir. Yüksek ısıl bozunma sıcaklığına, iyi elektriksel yalıtım özelliklerine, iyi korozyon direncine ve yüksek boyutsal kararlılığa sahip malzemelerdir. Güvenlik kalkanları, kamlar ve dişliler, uçak bileşenleri, elektrik rölesi ve bilgisayar terminalleri gibi kullanım alanlarına sahiptirler.

Polisülfon (PSU); sülfon grubu varlığıyla adlandırılmış olan bu termoplastikler yüksek sıcaklıklarda tokluk ve stabiliteleri ile bilinmektedirler. Polisülfonlar mükemmel ısı ve kimyasal kararlılık, radyasyona bağlı bozunmaya karşı yüksek direnç ve iyi elektriksel özellik gösterdiğinden dolayı konektör, televizyon bileşenleri, kapasitör filmler, tıbbi aletler ve korozyona dayanıklı borularda kullanılmaktadırlar [24].

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS); ısı dayanımını arttırıcı özellikteki akrilonitril, düşük sıcaklıklarda darbe dayanımı arttırıcı özellikteki bütadien ve rijitlik ve kolay işlenebilirlik özellikteki stiren monomerlerinden oluşan kopolimer bu malzeme üç bileşenin özelliklerine sahiptir. ABS malzemelerin en önemli özellikleri yüksek tokluk ve darbe dayanımı olan bu malzemelerin en büyük dezavantajı ise diğer termoplastiklere göre daha pahalı olmalarıdır. Metal ve ahşaba alternatif olabilecek bu malzemeler genellikle bir çok makine parçasında, elektrikli ev aletlerinde, elektronik cihazlarda, boru, ızgara gibi çevresel etkilere maruz kalabilecek malzeme seçiminde kullanılmaktadır [27].

Termosetler, kimyasal tepkimeler sırasında oluşan çapraz bağ nedeniyle katılaşıp rijit hal almaktadırlar. Kovalent bağlı çözünmeyen üç boyutlu çapraz bağların varlığı nedeniyle bu termosetler ısı ile viskoz hale gelmeden bozunduğundan dolayı geri dönüşümü kısıtlı malzemelerdir. Bu reçinelerin avantajları termal kararlılık ve kimyasallara karşı kararlılık ve düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Düşük yoğunluk ve maliyete sahip bu reçinelerin kullanılmasıyla elde edilen kompozitler; otomotiv, havacılık ve yapısal uygulamalarda edilmektedirler [24]. Yaygın kullanılan termoset malzemeler ve spesifik özellikleri Çizelge 2.2' de verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Termosetlerin spesifik özellikleri [24].

Reçine	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	HDT (°C)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
Epoksiler	1.2-1.3	55-130	2.75-4.10	48	100-270
Polyester	1.1-1.43	34.5-103.5	2.1-3.45	60-205	70-120
Vinil Ester	1.12-1.32	73-81	3.0-3.5	93-135	102-150
Fenolik	1.0-1.25	30-50	3.6	165-175	260
Poliimid	1.32	38.6	3.9	-	320-330
Poliüretan	1.1-1.15	1-69	0.069-0.69	50-205	135

Epoksiler; düşük büzülme ve nispeten düşük molekül ağırlığına sahip epoksiler iyi mekanik ve termal özellikler, yüksek korozyon ve kimyasal direncine sahiptirler. Kütleme ajanı veya sertleştirici epoksiler için gerekli bileşenler olmaktadır. Epoksiler yüksek sıcaklık gerekliliği bulunmayan havacılık uygulamalarında, denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Polyesterler; sahip oldukları iyi mekanik özellikler, kolay işlenebilirlik ve ucuz olması nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Polyesterler ultraviyole ışınlarına, su bazlı nemlenmeye karşı dirençli termosetlerdir. Aynı zamanda kaplama malzemesi olarak da kullanılan bu malzemelerin kullanımı kolay ve kürlenmesi hızlıdır.

Vinil Esterler; kullanımı ve performans özellikleriyle polyesterlere benzemektedirler. Epoksilere göre daha tok ve ucuzdurlar. Yüksek korozyon direncine sahip bu malzemeler denizcilik uygulamalarında kullanılmaktadır.

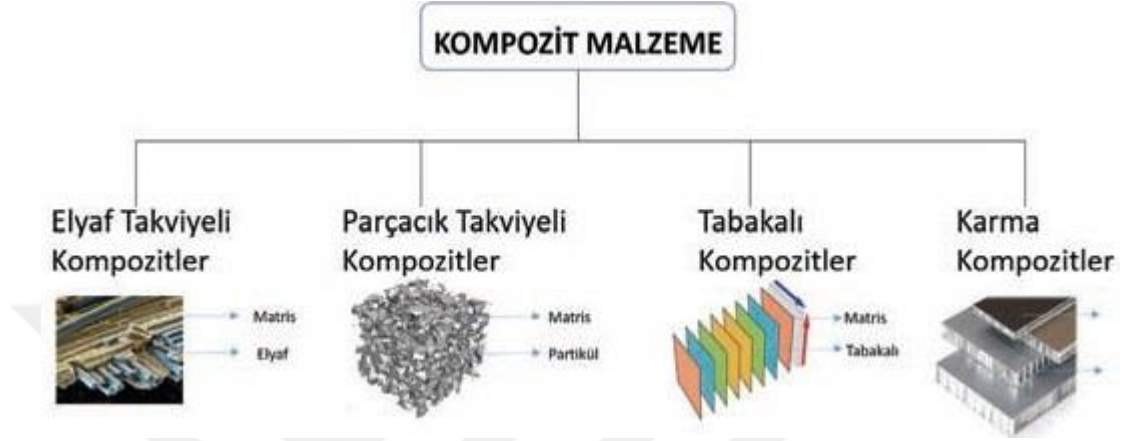
Poliüretanlar; sahip oldukları molekül yapısına göre termoset ve termoplastik özelliklerde olabilmektedirler. Yüksek aşınma ve kimyasal direnç, iyi tokluk ve elastik özelliklerinden dolayı fiber takviyeli yapısal köpüklerin üretiminde kullanılmaktadır [24, 28].

Fenolik ve Amino Reçineler; düşük maliyet ve iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra iyi elektrik iletimi ve ısı yalıtım özelliğine sahiptirler. Bu reçinelerin en önemli özelliği yüksek alevlenme dayanımıdır ve ani sıcaklık değişimlerinde iyi boyutsal kararlılık göstermektedirler. Elektrik uygulamalarında ve ahşap yapıların birleştirilmesinde yaygınca kullanılmaktadır [25].

Poliimidler; kompozit endüstrisinde yüksek sıcaklık uygulamaları için nispeten yeni malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Termal kararlılığı ve alev direnci epoksi reçinelere kıyasla daha iyidir. Poliimidler olumsuz çevre koşullarında mükemmel özellik göstermelerine rağmen düşük tokluk, yüksek nem tutma ve üretim zorluğu nedeniyle

daha az tercih edilmektedirler. Uzay ve havacılık, askeri, elektronik uygulamalarında ve yalıtım malzemelerinde kullanılmaktadırlar [28].

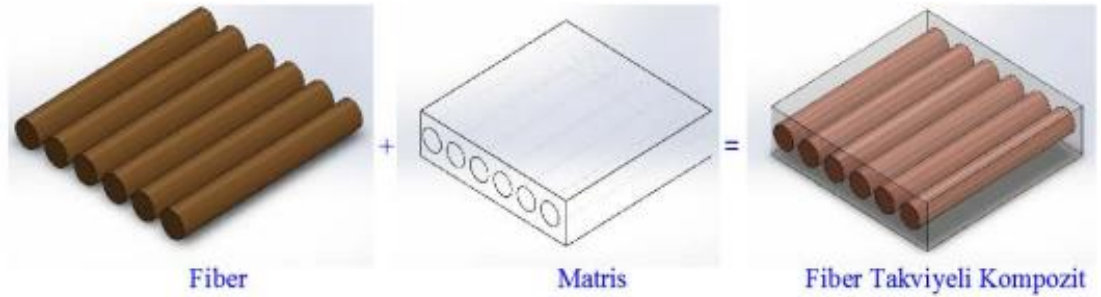
Takviye edici malzemeye göre kompozitlerin sınıflandırılması elyaf takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler, karma kompozitler olmak üzere dörde ayrılmış olup Şekil 2.4’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Takviye edici malzemeye kompozit malzemelerin sınıflandırılması [30].

2.1.2.4 Elyaf takviyeli kompozitler

Sünek matris yapılarına eklenen elyaf takviye edici elemanlar temel olarak sürekli ve süreksiz elyaflar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.5 fiber takviyeli kompozit ve bileşenlerinin şematik gösterilimini vermektedir.



Şekil 2.5 : Fiber takviyeli kompozit ve bileşenlerinin şematik gösterilimi [31].

Takviye elemanı matris yapıya gerekli mukavemeti ve sertliği kazandırmaktır. Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri; kullanılan matris türüne bağlı olmakla birlikte, kullanılan elyaf türü, şekli, dağılımı, hacmi, matris içindeki yönelmesi kompozit malzemenin özelliklerine doğrudan etkindir [31].

Polimer matris kompozitlerde genellikle cam, karbon, grafit, aramid veya doğal elyaflar takviye edici elyaf olarak kullanılmaktadır. Bu elyafların temel amacı polimer matrislerin sertliğini ve mukavemetini arttırmaktır.

Seramik matris ve metal matris kompozitlerde elyaf olarak genellikle bor, silisyum karbür, bornitrür gibi seramik yüksek mukavemet ve sertliğe sahip seramik elyaflar kullanılmaktadır. Bu elyaflar takviye edildikleri malzemelerin yüksek sıcaklığa direncini ve çatlamaya direncini arttırmaktadır [24, 31, 32].

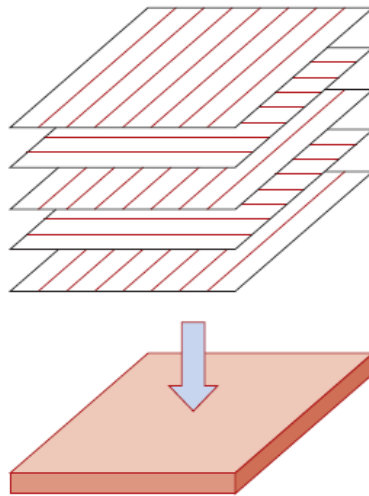
2.1.2.5 Parçacık takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlere göre üretimi daha kolay olan parçacık takviyeli kompozitler elyaf takviyeli kompozitlere göre daha yaygın kullanım alanına sahiptir. Matris içerisinde tek veya iki boyutlu makroskobik parçacıkların dolgu yada mikroskobik parçacıkların saçınma yoluyla kompozit elde edilmektedir.

Kompozit malzemede kullanılan matris yapısı, matris-parçacık ara yüzeydeki bağın dayanımına takviye edilen parçacık türü, dağılımı, boyutu kompozit malzemenin mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedir [24, 33].

2.1.2.6 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler en az iki farklı malzemenin tabakalı olarak aynı yada farklı açılarda istiflenerek istenilen rijitlik ve mukavemet değerinin sağlanmasına yönelik elde edilen kompozitlerdir. Tabakalı kompozitlere verilecek en basit örnek kontroplak malzemelerdir. Şekil 2.6’da tabakalı kompozit yapısı şematik olarak verilmektedir.



Şekil 2.6 : Tabakalı kompozit yapısı [34].

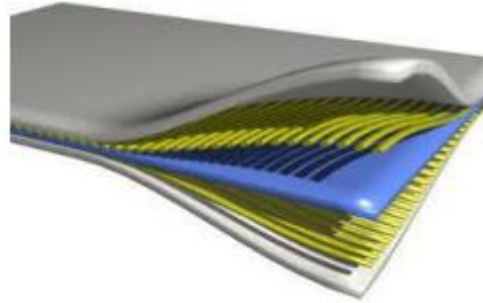
Yapısal olarak parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli kompozitlerden farklı olan tabakalı kompozitlerin her bir tabakası ayrı bir kompozit malzeme olup, her tabakasında ayrı elyaf malzeme kullanılarak da tabakalı kompozit elde edilebilmektedir.

Tabakalı kompozitlerde tabakalar tasarım ve kullanım gereksinimlerine göre mukavemet ve rijitliği elde etmek üzere matris içerisine geliş güzel, aynı ve farklı yönlü olarak oluşturulabilmektedir.

Tabakalı kompozitler ile yumuşak ve sert malzemelerin birleştirilerek aşınma direnci, sertlik gibi özelliklerde iyileşme, rijitlik gibi özellikler sağlanabilmektedir [34, 35]. Sandviç yapılı kompozitler tabakalı kompozitlere örnek verilebilmektedir.

2.1.2.7 Karma kompozitler

Hibrid kompozit olarak da adlandırılan bu kompozitlerde ddaha iyi özelliklere sahip bir kompozit malzeme elde etmek amacıyla matris yapı ile iki veya daha fazla farklı fiber ile bir araya getirilmektedir. Şekil 2.7 şematik olarak karma kompozitleri göstermektedir.

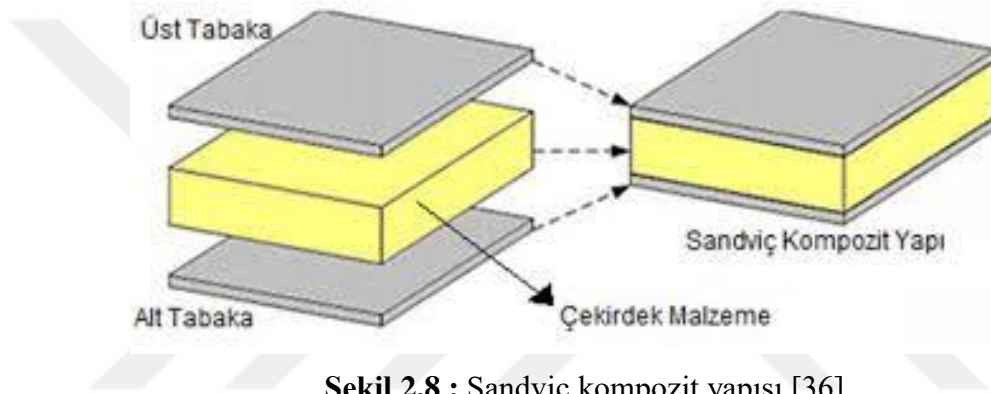


Şekil 2.7 : Karma kompozitlerin şematik gösterilimi [35].

Hibrid kompozitler için bilinen en yaygın örnek kevlar elyafli kompozit malzemedir. Kevlar ucuz ve tok olmasına rağmen basma mukavemeti zayıf bir malzemedir. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemetine sahip malzemedir. Bu iki fiberin katkısıyla elde edilen hibrit kompozitin tokluğu grafit malzemeden daha yüksek ve düşük maliyetli aynı zamanda basma mukavemeti de kevlar elyafli kompozitten basma mukavemeti de yüksek olmaktadır.

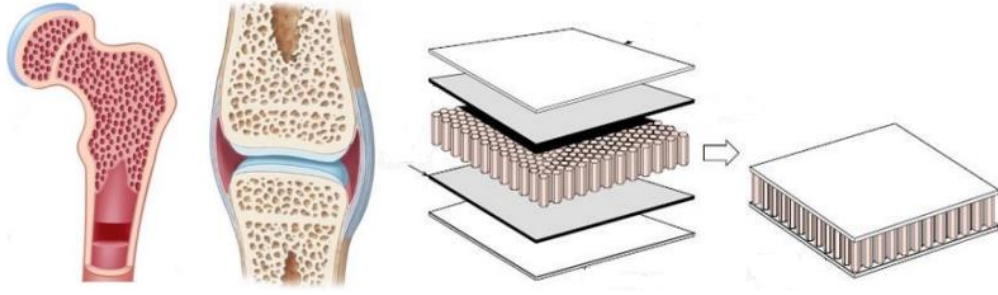
2.2 Sandviç Yapılı Kompozitler

Kompozitler arasında en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tabakalı kompozitlerin özel bir türü olan sandviç kompozitler merkezde çekirdek adı verilen hafif ve nispeten kalın bir yapı ile çekirdeğin altında ve üstünde ince iki tabakanın birbirine yapıştırılmasıyla elde edilmektedir. Dış plakalar genellikle fiber takviyeli plastik, alüminyum alaşımları yada süper alaşımlar, kontroplaktan oluşmaktadır. Çekirdek malzeme is nispeten hafif ve daha düşük elastisite modülüne sahip malzemelerden oluşmaktadır. Şekil 2.8 sandviç kompozitin yapısını şematik olarak gösterilimini vermektedir [36].



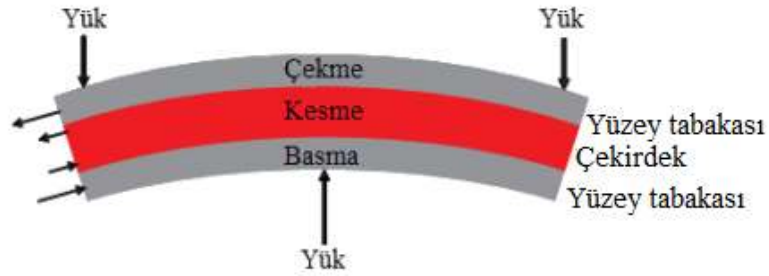
Şekil 2.8 : Sandviç kompozit yapısı [36].

Diğer kompozitlerde olduğu gibi sandviç kompozitlerin yapımında da doğadan ilham alınmıştır. Hayvan ve insan iskeletindeki kemik yapılar köpük çekirdekli sandviç yapılarına verilebilecek en iyi örneklerdendir. Çekirdek malzeme tüm yapının ağırlığını azaltmak için hücresel yapılara sahiptir ve karmaşık yüklenmelere maruz kalmaktadır. Şekil 2.9 köpük çekirdek tipi kompozit yapıya sahip insan kemik yapısı ve yaygın kullanılan bal peteği sandviç yapılarının temsili olarak benzerliğini göstermektedir. Diğer bir hücresel yapıya ait örnek doğadaki kuşlardır. Kemikleri önemli ölçüde hücre gözenekliliği içermektedir ve bu uçuş performanslarını arttırmaktadır [37].



Şekil 2.9 : İnsan kemik yapısının ve sandviç kompozitin benzerliğinin tesmili olarak gösterimi [37].

Çekirdek ve iki yüzey tabakasından oluşan sandviç kompozit yapı konsept olarak iki boyutta I kirişe benzetilmektedir. Yük altındaki sandviç kompozit yapıda yüzey tabakalar bükülmeden kompozit yapıyı korurken çekirdek yapı yüzey tabakalara kesme kuvvetini aktararak bükülmeye karşı sabitleştirmektedir. Çekirdek malzeme yük altında eğilmesi durumunda dahi yüzey tabakalarının birbirini üzerinden kaymasını önleyecek rijitliğe sahip olmalıdır. Şekil 2.10 eğilme durumunda sandviç kompozitte oluşan yükleri göstermektedir. Yük altında tabakaların biribiri üzerinden kayması durumunda kompozit yapı özelliğini kaybederek, ayrı malzemeler gibi davranıp kompozit malzemenin görevini yerine getirmemesine sebep olmaktadır [19].



Şekil 2.10 : Eğilme durumunda sandviç kompozitte oluşan yükler [38].

Sandviç kompozit yapımında kullanılan çekirdek ve tabaka malzemelerine bağlı olmak üzere çok farklı sandviç kompozit üretilmektedir. Genelde aynı kalınlık ve malzemedan yapılan yüzey tabakalarında fiber takviyeli plastik, çelik, aramid, alüminyum veya tahta en yaygın tercih edilen malzemelerdir. Sandviç kompozitlerde yapıştırıcının temel görevi yüzey tabakaları ile çekirdek yapısını bir arada tutarak ve yapı elemanlarına etkiyen yükleri uygun bir biçimde diğer aktarmaktır. Kullanılan yapıştırıcılara vinil fenolik, nitril fenolik, epoksiler örnek verilebilmektedir. Sandviç kompozitlerde kullanılan çekirdek malzemeye göre dolu gövdeli çekirdek tipi sandviç

kompozitler ve boşluklu gövdeli çekirdek tipi sandviç kompozitler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Dolu gövdeli çekirdek tipi sandviç kompozitlere balsa ve köpük çekirdekler örnek verilebilmektedir. Bu tip çekirdekler diğer çekirdek tiplerine kıyasla daha pahalı olmaktadır. Boşluklu çekirdek tipi sandviç kompozitlere bal peteği, oluklu ve kafes çekirdek yapılarıdır [38].

Sandviç kompozitler sahip oldukları ince cidarlı yapı ve diğer malzemelere kıyasla daha yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olduğundan dolayı oldukça tercih edilen kompozitlerdir. Sandviç kompozitler yapısı gereği diğer yapılara göre daha yüksek mukavemet, burkulma direnci ve daha düşük yanal deformasyonlara sahiptirler. Benzer mekanik özelliklere sahip diğer malzeme ve kompozit yapılara göre çok daha hafif olması özellikle hafifliğin önem arz ettiği hava araçları, deniz araçları gibi uygulama alanlarında oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır [39].

Sandviç yapılarda yapıya dahil edilen bileşenlerin her birinin sağlamış olduğu yek pare özellikler birleştirilerek daha üstün bir yapı oluşturulabilir yada bileşenlerin sahip olduğu negatif özellik ortadan kaldırılarak daha ideal yapı haline getirilebilmektedir.

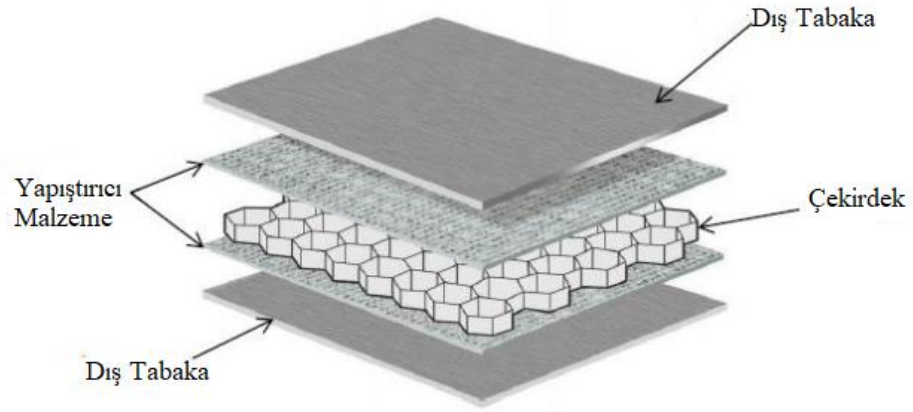
Sandviç kompozitler havacılık, uzay yapıları, rüzgar enerjisi için kanatlar, yüksek hızlı deniz araçları, yarış araçları gibi hızlı yüksek performans uygulamalarında hafiflik ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı önem teşkil etmektedir.

Sandviç yapılar oldukça verimli yük taşıma yapısı sağlamanın yanı sıra radar emici malzemelerin çekirdeğe yerleştirilmesiyle yapılan sandviç yapıların deniz araçlarında kullanılması gibi çok fonksiyonlu yapıların tasarlanmasında da olanak tanımaktadır [40].

2.2.1 Bal peteği yapılar

Bal peteği sandviç kompozitler çok ince tabakaların gerilerek veya yeniden şekillendirilerek bal peteği ile aynı altıgen yapıya dönüştürülen çekirdek malzemenin alt ve üst yüzey tabakalara yapıştırılmasıyla elde edilmektedir. Şekil 2.11 şematik olarak bal peteği sandviç kompozit yapısını sunmaktadır.

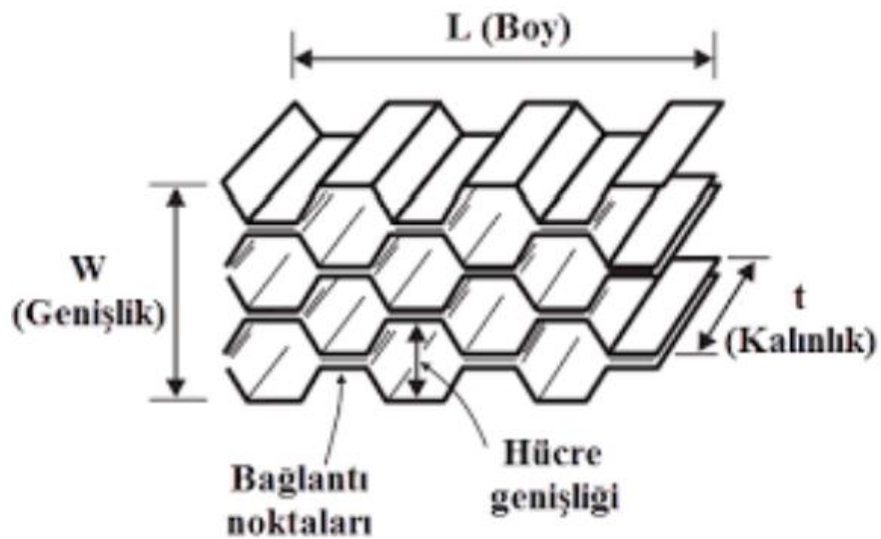
Bal peteği çekirdek yapıları kompozitler diğer sandviç çekirdek malzemelerine göre daha pahalıdır üretimi zordur. Bu nedenle yüksek mekanik dayanım sağlamak amacıyla genellikle denizcilik, havacılık ve uzay sektörlerine kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 : Bal peteği sandviç kompozitlerin yapısı [41].

Bal peteği sandviç kompozitlerde petek yapı için oluşturulmuş ince tabaka malzemelerden veya şeritlerden çeşitli çekirdek malzemeler yapılabilmektedir. Hücre malzeme seçimi, hücre duvarlarının kalınlığı, hücre boyutu, hücre şekli ve hücre porozitesi çekirdek yapının mekanik özelliklerine ve nihai ürünün özelliklerine doğrudan etkilediğinden istenilen uygulama alanının gerekliliğine göre geniş bir aralıkta çekirdek üretilmektedir.

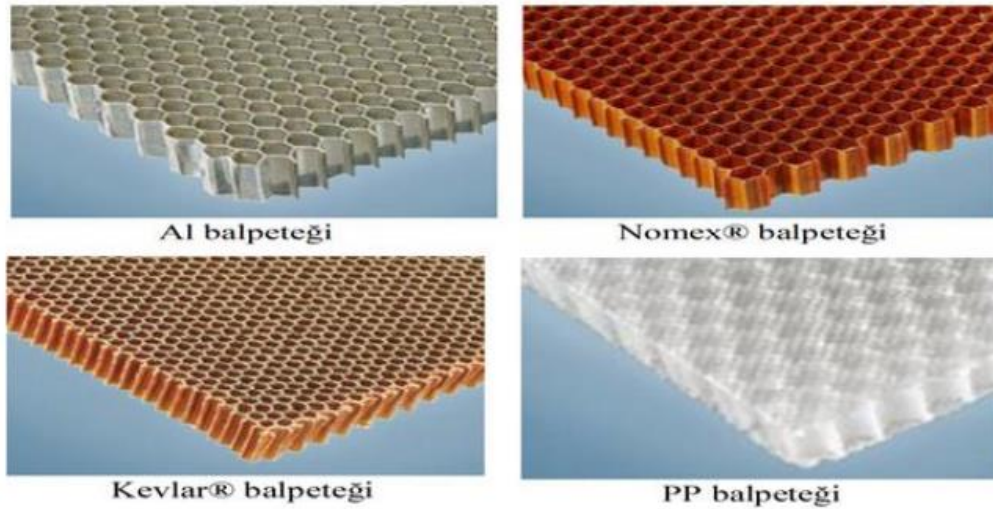
Yaygın kullanım alanına sahip petek çekirdeği orta miktarlarda tekli oluklu yapılardan oluşmaktadır. Çekirdek geometrisinde çok fazla üretim mevcut olsa da en yaygın kullanılan altıgen balpeteği yapısıdır. Şekil 2.12’de verilmektedir. Altıgen yapı ile daha az malzeme kullanılarak istenilen kafes yapılarak elde edilebilmektedir ve en küçük alan ile maksimum kapmayı sağlamaktadır [41, 42].



Şekil 2.12 : Bal peteğinin geometrisi [41].

Bal peteği yapılı sandviç kompozitler yüksek korozyon direnci, iyi elektrik ve ısı yalıtımı, bakteri dayanımı, yüksek kesme modülü, düşük genleşme katsayısı gibi sahip oldukları genel avantajların yanı sıra yüzeye gelen darbelere karşı dayanım ve birim yoğunluğa düşen mukavemet değeri ve yüksek kesme dayanımı gibi üstün özelliklere sahiptirler. Ancak yüksek maliyetleri, üretim sürecinin zorluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan bal peteği çekirdek yapıları alüminyum, fenolik reçineye batırılmış aramid kağıdı, polipropilen, polikarbonat veya kumaştan yapılmaktadır. Bal peteği için kullanılan tabaka malzemeleri alüminyum levha, çelik levha, fiber katkılı plastikler ve paslanmaz çeliklerdir. Bal peteği yapılar endüstriyel kullanım alanlarına göre uçak ve otomotivde aşınma direnci ve mukavemeti yüksek nomex ve keklar petekleri, deniz ve raylı sistemlerinde kullanılabilecek hafif, alev direnci yüksek alüminyum alaşımlı bal petekleri ve kimyasal ve ucuz olan termoplastik bal peteleri olmak üzere üç şekilde gruplandırılmaktadır. Şekil 2.13 nomex, keklar, alüminyum ve termoplastik bal peteklerine ait görseli vermektedir.



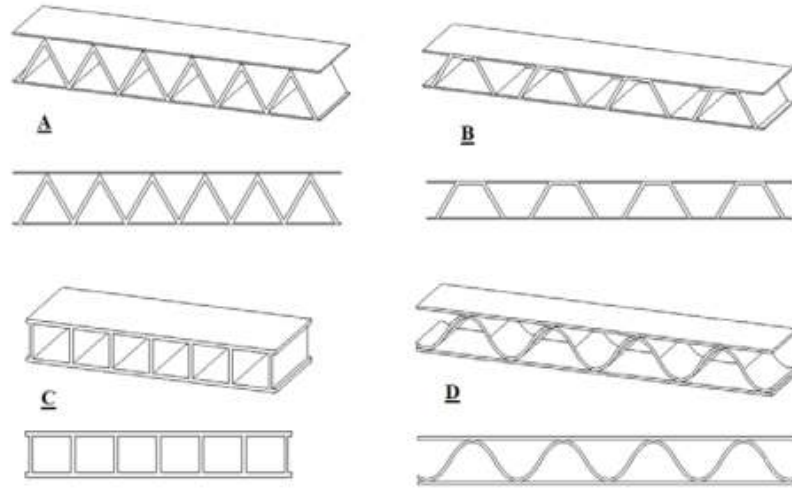
Şekil 2.13 : Nomex, keklar, alüminyum ve termoplastik bal petekleri [42].

Uygulama alanlarına örnek verilmesi gerekirse denizcilik sektöründe sandviç tekniği ile üretilen teknelerin mekanik dayanımı arttırılmaktadır. Hafiflik ve rijitlik özellikleri önem taşıyan havacılık ve uzay uygulamalarında ise genellikle uçak tabanları, kanat ve kuyruk parçalar, helikopter pervanesi gibi parçalarda bal peteği yapılı sandviç kompozitler kullanılmaktadır. Hafif konstrüksiyon uygulamalarının önem kazandığı otomotiv sektöründe de otomobillerin tavan, direk ve gövdesinin birçok kısımlarında

kullanılan bal peteği sandviç kompozitler enerji sönümleme, radyo dalgası kalkanı güneş panellerinde de yaygınca kullanım alanına sahiptirler [42].

2.2.2 Oluklu yapılar

Yüksek dayanıklı sandviç panel yapımında en çok tercih edilen çekirdek yapılarından biri de oluklu yapıdaki çekirdeklerdir. Oluklu çekirdekler balpeteği çekirdek yapılarının yapımında kullanılan ara formdur. Oluklu yapıdaki çekirdekler esasen balpeteği yapılarının üretilmesinde kullanılan ara form olup sandviç panel yapımında oldukça tercih edilen pratik çekirdek yapılarından biridir. Balpeteğinin ara formu olmasından dolayı bal petek yapılara kıyasla daha kolay üretilebilir olmaları sahip olduğu avantajlardan biridir. Oluklu yapıdaki çekirdekler yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri nedeniyle patlama riski bulunan zemin ve duvarlarda, sıvı-gaz nakliye tanklarında, askeri alanlarda kullanılmaktadır. Oluklu kanallar dış tabakalara paralel uzanırken petek çekirdeği hücre eksenleri dış tabakalara göre normal konumdadır. Oluklu yapılar bal peteklerinden farklı olarak tek eğriliğe kadar oluşturulmaktadır. Oluklu yapılar üçgen, trapezoidal, kare ve sinüzoidal geometrilerde üretilmektedir. Şekil 2.14 oluklu yapılara ait görsel verilmektedir.



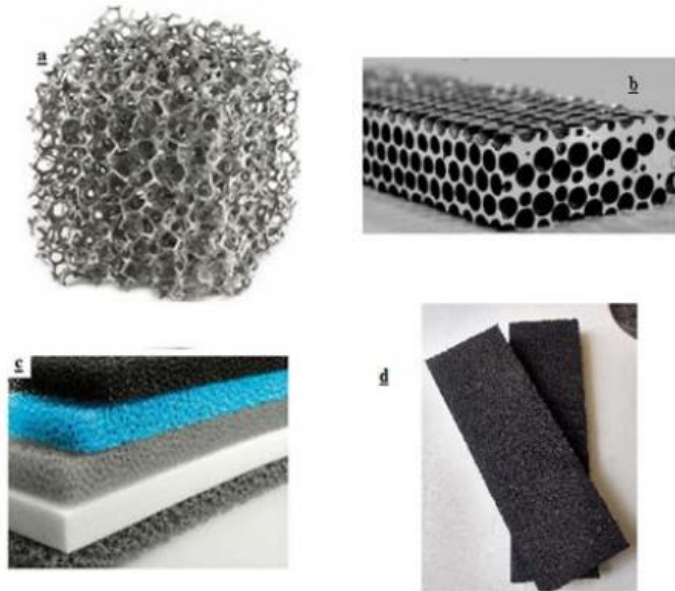
Şekil 2.14 : Farklı geometrilerde oluklu çekirdek yapıya sahip sandviçler A)Üçgen B)Trapezoidal C) Dörtgen D)Sinüzoidal [43].

Bal peteği yapılar ile oluklu yapılar arasındaki en temel farklılıklardan bir tanesi de çekirdek yapı olarak kullanımlarında boylamasına ve diklemesine olarak kullanım farklılıklarıdır. Bilindiği üzere balpeteği yapılar yapıya rijitlik ve yüksek dayanım sağlamak adına gözenekleri yüz tabakaları tarafından kapatılacak şekilde yerleştirilir.

Oluklu çekirdek yapılarında ise bu durum tam tersi olarak uygulanır. Bu uygulama farkı da oluklu çekirdeklere temelde şu iki avantajı sağlar; bunlardan ilki yapının plastik deformasyon özelliği kazanmasıyla elde ettiği enerji sönümlene yeteneği diğeri ise yapı boyunca oluşan oluk kanalları sayesinde yapının kazandığı havalandırma mekanizmasına sahip olmasıdır ki bu sayede yapı nem tutmayan bir karakteristiğe sahip olur. Sandviç yapının nem tutması yapıştırıcı başta olmak üzere yapının tamamına zamanla zarar vereceği gibi yapının sahip olduğu ağırlığı da arttıracaktır. Oluklu yapılarında farklı malzemeler kullanılarak üretilebilmektedir. Fakat en yaygın kullanılanları çelik ve alüminyum levhalardır [43].

2.2.3 Köpük yapılar

Ahşap gibi doğal çekirdek malzemelerinin yoğunluk ve nem emiliminde istenmeyen değişikliklerden dolayı geliştirilen köpük yapılar içerisinde büyük oranda hava bulunduran plastik, seramik ve metallerden üretilen yapılardır [44]. Köpük çekirdekler sahip oldukları enerji sönümlene kabiliyeti, düşük yoğunluk, termal performans ve düşük ağırlıklarından dolayı oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Köpük yapıları açık hücreli, kapalı hücreli veya karma hücreli olabilmektedir. Açık hücreli yapıya sahip köpükler daha düşük mekanik özelliklere sahiptir [45]. Farklı hücre yapılarına sahip ve farklı malzemelerden yapılmış köpük yapıları Şekil 2.15’ de verilmektedir.



Şekil 2.15 : Farklı malzemelerden üretilmiş köpük yapılar a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal c) Açık hücreli polimerik köpük d) Kapalı hücreli polimerik köpük [41].

Metalik köpükler ergimiş saf metal veya metal alaşımlarının uygun köpürtücü ajanlar ile karıştırılarak gözenekli bir katı oluşturacak şekilde soğutulmasıyla elde edilmektedir. Sahip oldukları %75 ile %90 hava oranı sayesinde yüksek titreşim ve düşük ısı iletim özelliklerinden dolayı kullanımı otomotiv sektöründe giderek artmaktadır [46].

Plastik çekirdekler çekirdek malzeme için gerekli yoğunluk aralığına düşürülerek köpüklenerek genişletilmektedir. En çok kullanılan plastik köpüklerden poliüretan köpük oldukça düşük maliyete sahip çekirdek yapısındadır. Özellikle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmakla birlikte bünyesinde su ve bakteri tutmaması, polyester ve epoksi reçinelerle uyumlu olmasından dolayı denizcilik uygulamalarında da tercih edilmektedir. Tüm plastik malzemelerden çekirdek yapılabilmesine rağmen en çok tercih edilen bir başka plastik köpük çeşidi olan vinil köpüğü hidrokarbonlara, deniz suyuna dirençli, set ve kapalı hücre yapısına sahip bir malzemedir. Yüksek mekanik özelliklere ve kolay kullanıma ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılabilecek olan bu köpük çeşidi en çok otomotiv ve uçak sanayinde tercih edilmektedir [46].

Köpük yapıları çekirdekler özellikle balpeteği ve oluklu çekirdek yapıları malzemelerin kullanılmadığı karmaşık yapılarda kullanılan çekirdek yapısıdır. Tek başına kullanılabilecekleri gibi diğer çekirdek yapılarıyla da birleştirilerek kullanılabilmektedirler. Petek çekirdeklere göre daha düşük mekanik özellik göstermelerine rağmen yüksek ısı ve ses yalıtımı sağlamaktadırlar [45, 47].

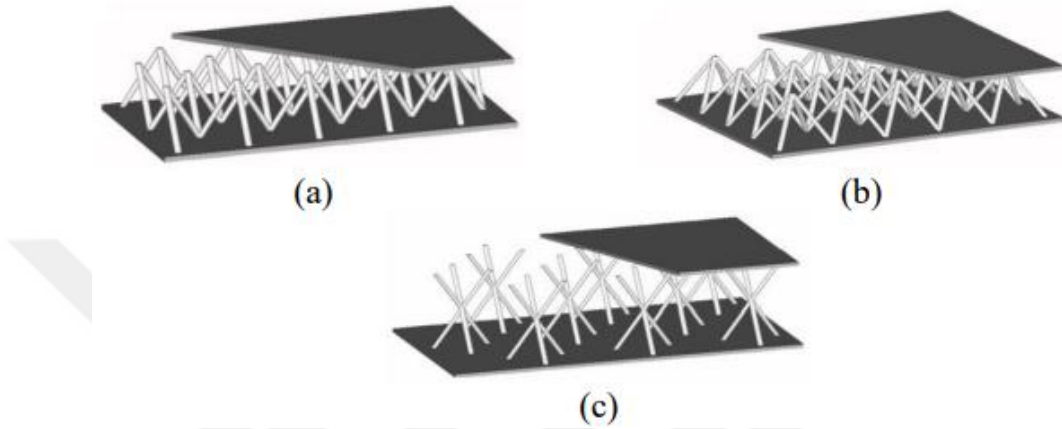
2.2.4 Kafes yapılar

Kafes çekirdek yapıları bal peteği çekirdeklere alternatif olarak üretilen kafes çekirdek yapıları boşlukların periyodik olarak üst üste veya yan yana oluşturulduğu yapılar olup nispi yoğunlukları %10'un altındadır [48]. Düşük yoğunluğun yanı sıra kafes çekirdek yapıları yüksek eğilme ve ezilme direncine sahiptirler. Açık hücreli, hafif ve çok fonksiyonlu yapıları sayesinde gelişmiş enerji sönümleme özellikleri göstermektedirler.

Kafes çekirdek yapıları çok çeşitli geometrilerde olabilmelerine rağmen en bilinen ve yaygın olarak kullanılan dörtyüzlü (tetrahedral), pramit ve üç boyutlu kagome yapılarıdır. Şekil 2.16 en yaygın olarak kullanılan kafes çekirdek yapılarını vermektedir [49]. Kafes çekirdek yapısına sahip kompozitler yük altında aksenal gerilime dayanım

gösterebilmek üzere tasarlanmışlardır. Bu özellik sayesinde eğilme gösteren köpüklere kıyasla daha üstün yapısal performans göstermektedirler.

Aynı zamanda nispi yoğunlukları ile paralel sertlik ve mukavemete sahip olmalarından dolayı aynı malzemeden yapılmış köpük yapılara kıyasla daha rijit ve mukavemetli olmaktadır [50].

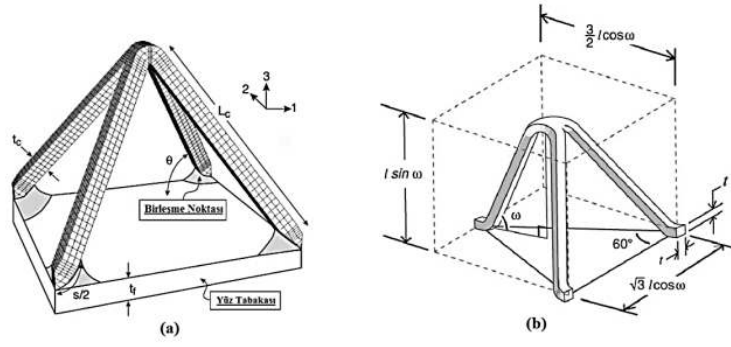


Şekil 2.16 : Farklı kafes çekirdek geometrilerinin şematik gösterilimi a) Tetrahedral b)Piramit c) Üç boyutlu Kagome [49].

Kafes yapılı çekirdek kompozitler sahip oldukları çekirdek boşlukları ve hücre yapıları sayesinde yüksek termal aktarım özelliği göstermektedirler ve soğutma amacı olan uygulamalarda da kullanılabilmektedirler. Sahip oldukları yapı sayesinde aynı zamanda patlama veya çarpma kuvvetlerinden kaynaklı şok yüklerinin ve gerilme dalgalarının azaltılmasında kullanılmaktadırlar [50].

Kafes çekirdekler sahip oldukları yüksek nispi mukavemet, yüksek özgül şekil değiştirme, yüksek pozitif ve negatif Poisson oranı, darbe sönümleme, yalıtım gibi özelliklerinden dolayı uygulama alanının gereksinimi doğrultusunda mekanik, termal ve akustik özellik kombinasyonlarına sahip oldukları için çok işlevli yapısal uygulamalarda potansiyel fırsat sunmaktadır.

Şekil 2.17 kafes çekirdek yapılarından piramit ve tetrahedral geometrilerinin tek hücreli geometrilerini şematik olarak göstermektedir. Kafes çekirdek yapılar aynı zamanda bal peteği çekirdeğin nem karşısında korozyona uğraması ve delaminasyon potansiyeli gibi yetersizlikler için alternatif oluşturmaktadırlar [49].



Şekil 2.17 : Tek hücreli kafes yapıların geometrileri a) Piramit kafes b) Tetrahedral kafes [49].

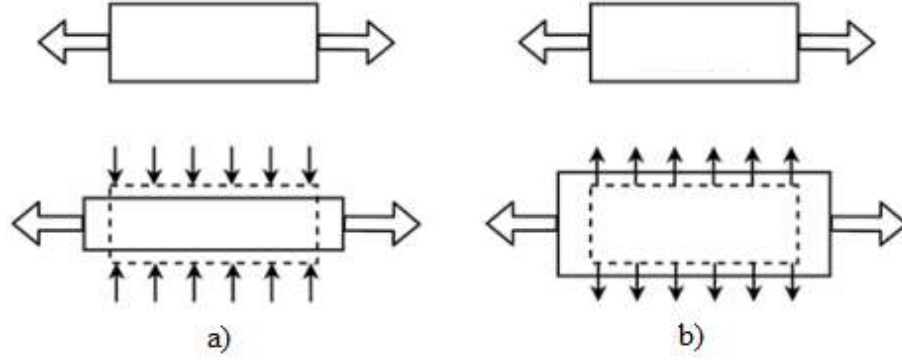
2.2.5 Öksetik (Auxetic) yapılar

Öksetik malzemelerin tanımının daha iyi kavranması için öncelikle Poisson oranının açıklanması gerekmektedir.

Poisson oranı:

Yük uygulanan bir malzemede uygulanan kuvvet yönündeki kısalma ile diğer yöndeki uzama miktarı arasındaki bağıntı olup günümüzde çoğu mühendislik malzemesinin yapısını belirlemeye yarayan özelliklerden biridir. Poisson oranı kısaca malzemede enine kısalmanın boyuna uzamaya oranıdır. Örneğin malzemeye uygulanan çekme testi esnasında çekme yönüne dik daralma eğilimi göstermesi, malzemenin Poisson oranının pozitif olması ile ifade edilmektedir. Poisson oranı negatif yada pozitif olabilmektedir. Kullanılan çoğu malzeme pozitif Poisson oranına sahip olup bu değer yaklaşık olarak 0,3 civarındadır. Doğada Poisson oranı sıfırdan küçük olan malzemeler de bulunmaktadır. Yakın geçmişte negatif Poisson oranına sahip yapay malzemeler de bulunmuştur. Pozitif Poisson oranına sahip malzemelerde; malzemeye bir doğrultuda bası kuvveti uygulandığında uygulanan kuvvete dik doğrultuda malzeme genişleme göstermektedir. Negatif Poisson oranına sahip malzemelerde ise malzemeye bir doğrultuda çekme kuvveti uygulanarak uzatıldığında bu kuvvete dik olan doğrultuda da uzama meydana gelmektedir [52].

Şekil 2.18 negatif Poisson oranına sahip malzeme ve pozitif Poisson oranına sahip malzemenin uygulanan tek yönlü çekme kuvvetine göre davranışlarını göstermektedir.



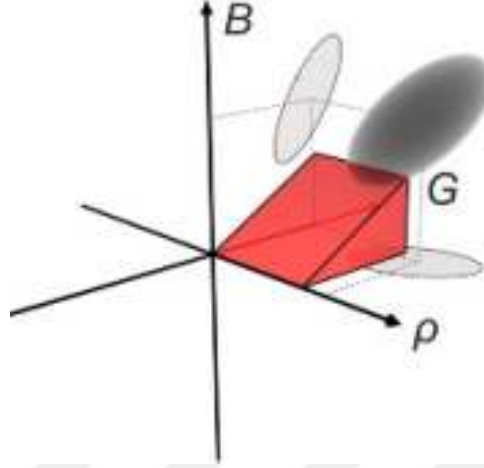
Şekil 2.18 : Negatif ve pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin tek yönlü çekme kuvvetine göre davranışları a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme b) Negatif Poisson oranına sahip malzeme [52].

Negatif Poisson oranına sahip malzemeler genellikle kafes yapılarından oluşmaktadır. Bir şeklin negatif Poisson oranına sahip olması sahip olduğu kafes geometrisiyle ilgilidir. Şeklin kenar uzunlukları ve iç açılarına göre konveks ise pozitif Poisson oranı gösterirken konkav olması durumunda negatif Poisson oranı değeri göstermektedir. Negatif Poisson oranına sahip malzemeler uygulanan yüke karşı gösterdikleri davranıştan dolayı kelime anlamı genişlemeye eğimli yunanca kökenli öksetik (Auxetic) malzemeler olarak da adlandırılmaktadır. Negatif poisson oranına sahip malzemeler pozitif Poisson oranına sahip malzemelere kıyasla daha yüksek sertlik, kırılma tokluğu, yüksek darbe emilimi gibi gelişmiş mekanik özellikler göstermektedirler [50]. Negatif Poisson oranına sahip malzemelerin önemli bir diğer özelliği de hafif yapı olmalarıdır. Öksetik malzemelerin kedi ve kertenkele ciltleri, insanın sahip olduğu bazı eklemeleri demir pirit ve arsenik gibi doğada örnekleri bulunmasına rağmen mantık olarak algılanıp malzemelere uygulanması 2000’li yıllara dayanmaktadır [54].

1987 yılında Roderic Lake tarafından yapılan poliüretan köpüklerin sıcaklık ve üç yönlü sıkıştırma çalışması sonucunda elde edilen ilk yapay öksetik yapı ile öksetik malzemeler tanınmaya başlanmış olup daha sonrasında hücresel öksetik petek yapılar üzerine birçok çalışma yapılmıştır [55].

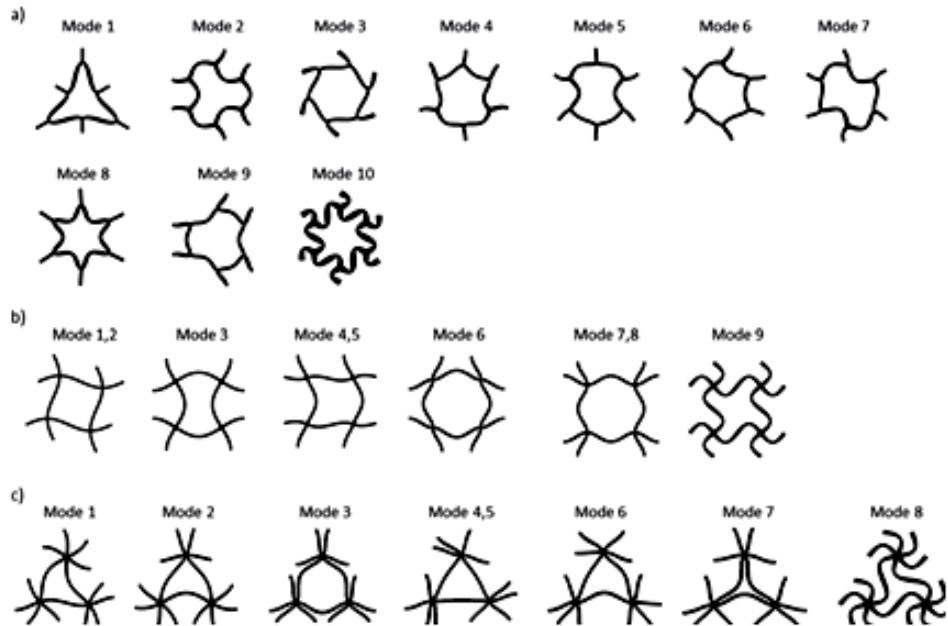
Geleneksel katı malzemeler ile karşılaştırıldığında hücresel malzemeler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek enerji sönümleme, yüksek akustik davranışı gibi özelliklerden dolayı teknolojinin gereklilikleri doğrultusunda kullanılmaktadır. Öksetik malzemelerin keşfiyle başlayan hücresel öksetik malzemeler geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldığında geleneksel malzemelerin aksine dik baskı kuvveti

altında daralma davranışı sergilemektedir. Şekil 2.19 öksetik malzemelere ait Milton-Ashby haritasını göstermektedir. Şekilde B, Elastik Modülü, G, Kayma Modülünü, ρ yoğunluğu, elipsler katı malzemelerin özelliklerini, kırmızı alan hücresel öksetik malzemelerin özelliklerini temsil etmektedir [56].



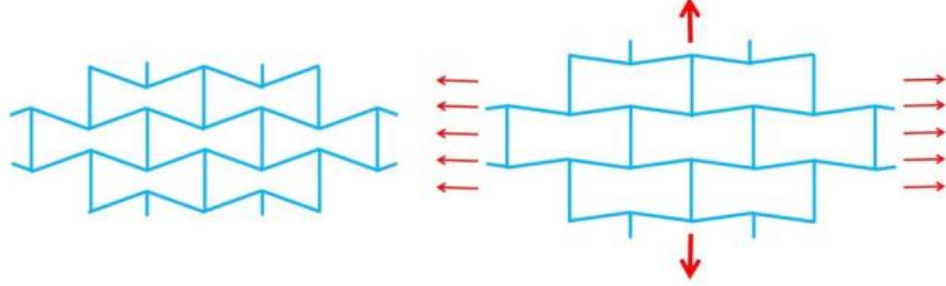
Şekil 2.19 : Milton-Ashby öksetik malzemelerin haritası [55].

Yapılan mühendislik tasarımlarıyla Pozitif Poisson Oranına sahip malzemelerden öksetik yapılar elde etmek mümkündür. Bu tarz tasarımlarla elde edilen malzemeler metamalzemeler olarak adlandırılmaktadır [57]. Metamalzemeler ile ilgili şimdiye kadar hem makroskobik hem de mikroskobik seviyede çok fazla malzeme geliştirilmiştir. Metamalzemelerin temel geometrilerini oluşturan tasarımlar Şekil 2.20’de verilmektedir [58].



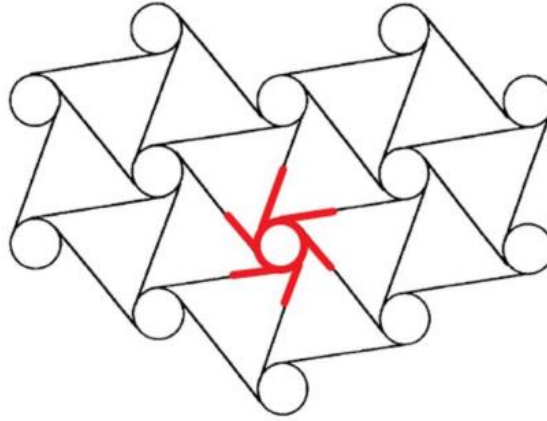
Şekil 2.20 : Metamalzemelerin şeklini oluşturan geometriler [58].

Temel geometrilerde yaygınca kullanılan geometrilerden biri Yeniden Kıvrımlı (Re-entrant) geometridir. Gibson ve arkadaşların tarafından geleneksel balpeteği hücresel yapıda yayınlanan bu yapı ve bu yapının öksetik davranış şekli Şekil 2.21’de verilmektedir. Yeniden kırıli yapıya yatay yönde gerilim uygulandığında dikey yönde uzama görünmektedir.



Şekil 2.21 : Yeniden kırıli yapı ve öksetik davranış [59].

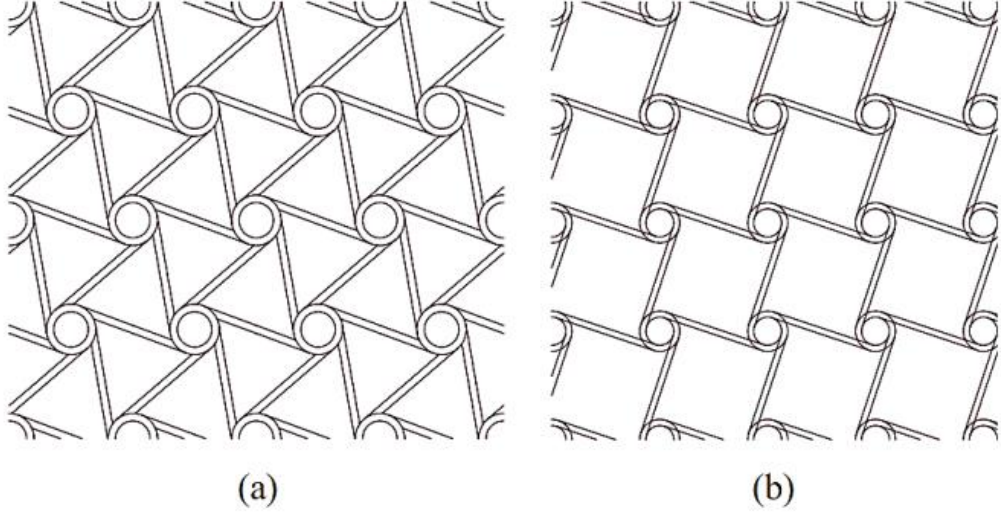
Yaygın olarak kullanılan bir başka hücresel öksetik yapı Prall ve Lakes tarafından araştırmaları yapılan kiral (Chiral) yapılardır. Bu yapılar merkezi düğümlere bağlanarak oluşturulur ve düzlem dışı yönde kubbe şeklinde yapı oluşturmaktadırlar. Şekil 2.22 tipik bir kiral modelini vermektedir.



Şekil 2.22 : Kiral modelinin şematik gösterimi [58].

Kiral modeller birbirine bağlı aynı yarıçaplı ve eşit uzunluktaki dairesel düğümlerden oluşmaktadır. Her bir düğüme bağlı bağ sayısı bu modellerin farklı kafeslere sahip olmasına neden olmaktadır [59]. Kiral modeller geleneksel altıgen peteklere göre kıyasla basma ve kayma mukavemetleri bağlar arasında kısmen ayrılmıştır ve bal peteğinin hem eksen dışı deformasyonları hem de elektromanyetik işlevselliği bal peteği geometrisinin çeşitliliği ile ayarlanabilmektedir. Çok fazla geometrik yapıda

bulunan kiral yapıların en yaygın kullanılan geometrileri hexachiral ve tetrachiral yapılara ait görseller Şekil 2.23’de gösterilmektedir [60].

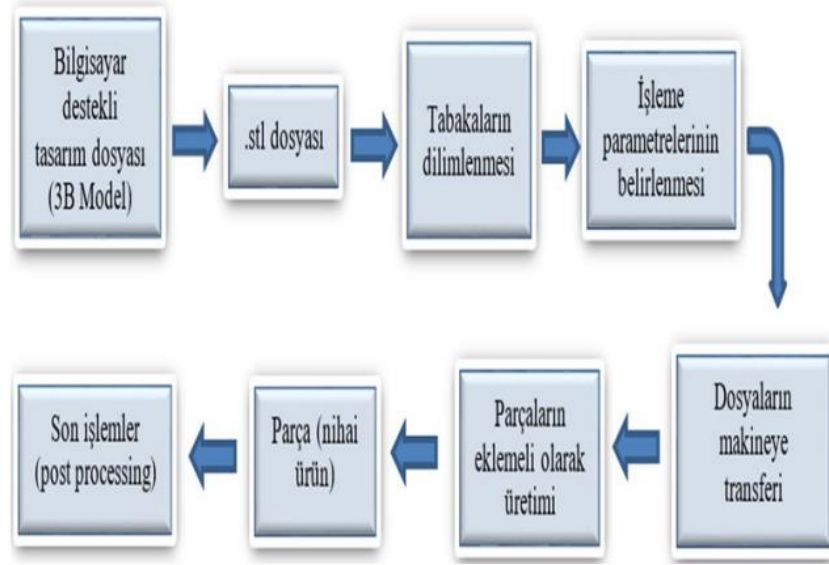


Şekil 2.23 : a) Hexachiral ve b) Tetrachiral ökzetik yapılarının geometrilerinin şematik gösterimi [60].

2.3 Üç Boyutlu Yazıcılar

Gelişen teknoloji ile birlikte alternatif üretim yöntemleri de keşfedilip geliştirilmiştir. Kağıt baskıların yanı sıra malzemelerin katmanlar halinde üst üste baskılanmasıyla elde edilen üç boyutlu baskı olarak da adlandırılan eklemeli imalat yöntemlerinin ortaya çıkışı 1980’li yıllara dayanmaktadır.

Geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında yeni bir parça üretmek eklemeli imalat yöntemlerinde daha hızlı olmaktadır ve geleneksel üretim yöntemlerinde olduğu gibi birden fazla işlem basamağına, kişi bilgi ve beceresine gerek duyulmamaktadır. Aynı zamanda geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan talaşlı imalata göre daha az malzeme atığı ve daha fazla tasarım ve geometri esnekliği sunmaktadır. Özellikle mimarlık ve üretim alanlarında yaygınca kullanılan eklemeli imalat yöntemleri hızlı prototipleme olarak öne çıkmaktadır [61]. Üç boyutlu baskı uygulamaları her geçen gün daha da gelişmekte ve yeni baskı metotları da ortaya çıkmaktadır. Endüstride ihtiyaç duyulan alanlara sağladığı kolaylık sayesinde de yeni metot arayışları ve 3 boyutlu baskı teknolojisi gelişmeye devam edecektir. Üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi temel olarak aynı olup Şekil 2.24’de verilmektedir.



Şekil 2.24 : Üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi [62].

İlk olarak üretilecek parça bilgisayar destekli tasarım programıyla (CAD) tasarlanmaktadır.

Tasarlanan üç boyutlu model dosyası üç boyutlu verilerin düzenini açıklayan ve katı modelin yüzey geometrisini çok küçük üçgenlere bölerek yeniden oluşturan STL (Stereolitografi) dosya formatına dönüştürülmektedir. STL üçgen şekillerin geometrisine dayanmaktadır ve üç boyutlu yazdırma işlemi için en iyi akış sağlayan dosya formatıdır. Üç boyutlu yazıcılar yazım esnasında katmanları tek seferde bir katman olarak bastığından STL dosyalarının yazıcıya göndermeden önce dilimleyici olarak adlandırılan arayüz programlarıyla katmanlara ayrılmaktadır. Katmanlara ayrılan dilimlenmiş dosya üç boyutlu yazıcının katı modelleri oluşturmak için kullanılan programlama dili olan G kodu formatındadır. G kodu formatındaki katı model, işleme sıcaklığı, katman kalınlığı, işleme hızı, tabla sıcaklığı gibi yazdırma parametreleri belirlenerek üç boyutlu yazıcıya transfer edilerek yazdırma işlemi başlatılmaktadır. Nihai işlemde yüzey kalitesini arttırmak ya da parçayı renklendirme gibi üretim sonrası işlemler uygulanabilmektedir [63].

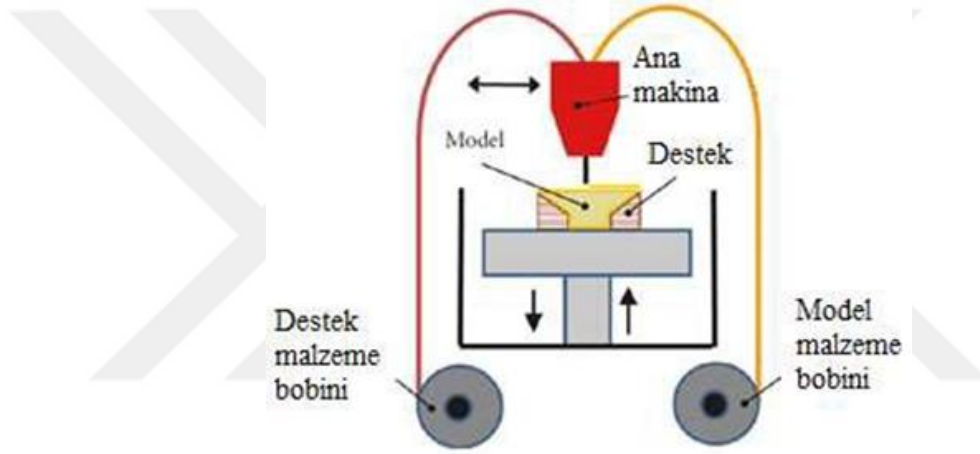
2.3.1 Üç boyutlu yazıcı çeşitleri

2.3.1.1 Ergiyik yığma modelleme (Fused deposition modelling FDM)

FDM yönteminde, makaraya sarılı halde bulunan termoplastik bir polimer malzeme sürekli akış halinde olmaktadır. Ekstrüderden geçen filament, hot end denilen bölgeye

giderek burada bulunan nozzle, termoplastik filamenti yarı sıvı hale getirecek sıcaklığa önceden ayarlanmaktadır. Filament, nozzle ucundan yine daha önce ısıtılmış halde bulunan tablaya akıtılmaktadır.

Üretilen ürünün, termoplastik bir polimerden yapılması, katmanların birbirine yapışması ve daha sonrasında katılaşması için önemli bir faktör olmaktadır. Termoset polimerler ısıtıldıklarında ergime yerine yanama reaksiyonuna girdiklerinden dolayı kullanımı mümkün olmamaktadır. Filamentin katman kalınlığı, genişliği, erime hızı, motorun hareket etme hızı, katmanlar arasındaki bozulma üretilen ürünün kalitesini ve mekanik özellikleri belirlemektedir. Şekil 2.25’de FDM’in çalışma prensibine ait görsel verilmektedir.



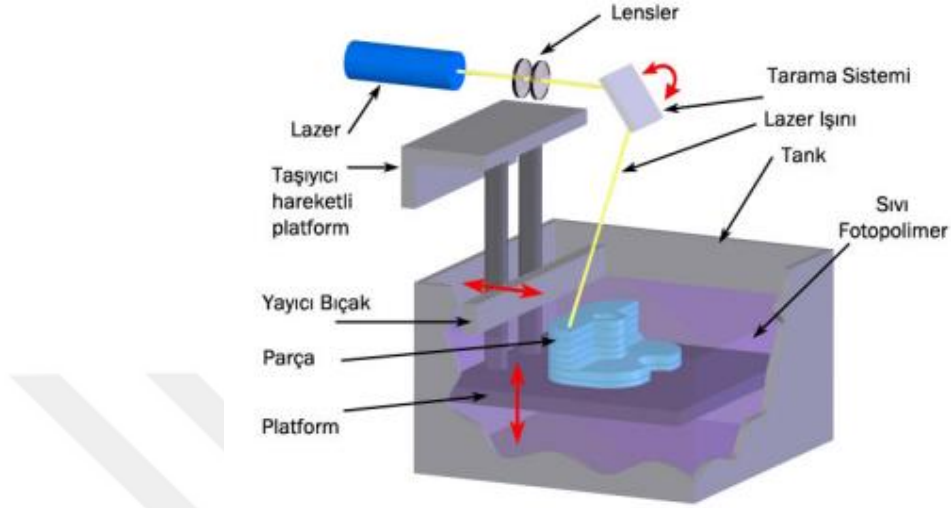
Şekil 2.25 : Ergiyik yığma modelleme çalışma prensibi [64].

FDM yöntemi düşük maliyetli, yüksek hız ve sürecin basit olması gibi avantajlar sunmaktadır. Bunların aksi olarak ise zayıf mekanik özellikler sahip ürünler elde etme, daha az malzeme seçeneği gibi dezavantajlar da mevcut olmaktadır [64].

2.3.1.2 Stereolitografi (SLA)

SLA yöntemi üretilen ilk üç boyutlu yazıcı yöntemidir. Sıvı halde bulunan termoset polimer bir malzeme, yazıcının sıvı tankına konularak UV ışığı ile her katman kürleme işlemine tabi tutulmaktadır. Her katman kürleştirildiğinde, ürün Z ekseninde yazıcının tipine göre bir katman kadar yukarı çıkar veya bir katman kadar aşağı inerek bir sonraki katman da aynı şekilde kürlenmektedir. İşlem tamamen bittiğinde ise modellenmiş ürün tamamen sıvıdan çıkarılmaktadır. Duruma göre yeniden kürleştirme işlemleri yapılabilmektedir. SLA ile karmaşık parçalar ve yüksek yüzey kalitesine sahip parçalar üretilmektedir.

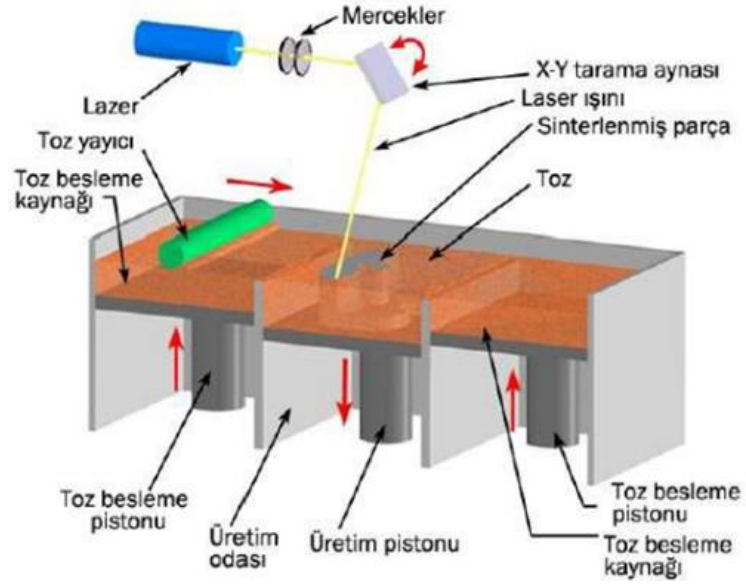
Görselliği önemli olan ürünler için de uygun bir yöntemdir. Bu avantajların yanında kırılğan olması, güneş ışığında bozunmaları, yavaş olması, maliyetinin diğer yöntemlere göre nispeten yüksek olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [64,65]. Şekil 2.26’da SLA’nın çalışma prensibine ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.26 : Stereolografi çalışma prensibi [65].

2.3.1.3 Seçici lazer sinterleme (SLS)

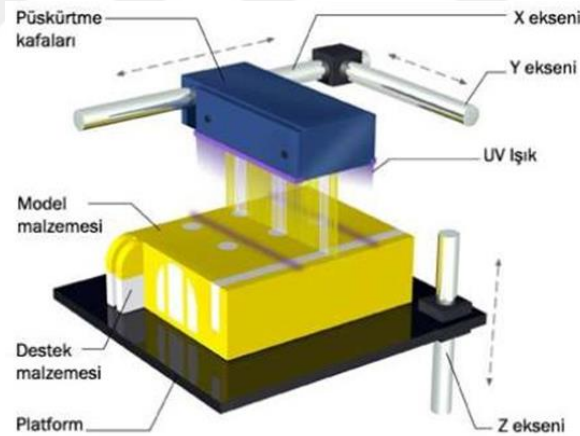
Şekil 2.27’de çalışma prensibine ait görseli verilen SLS yönteminde seramik, polimer ve metal malzemeler 3 boyutlu yazıcı ile üretilebilmektedir. Metal, seramik ve polimer tozlar toz haznesine doldurulmaktadır. CAD programında tasarlanarak ürün sisteme aktarılmaktadır. Tozlar üzerine mercek vasıtasıyla lazer ışını gönderilmektedir. CAD programında tasarlanmış olan geometriye göre toz sinterleme işlemi yapılmaktadır. Sinterlenen tozlar bir katmanı tamamlandığında, sistem Z ekseninde bir katman aşağı inmektedir. Toz yayıcı ile de tabana yeniden bir katman kalınlığında toz yayılır ve sinterleme işlemi tekrar edilmektedir. Bu şekilde katman katman işlem yapıldıktan sonra ürün haznedan alınarak temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile FDM’ye kıyasla daha yüksek çözünürlüklü ürünler elde etmek mümkündür. Kullanılan tozlar tekrar kullanılmaya elverişli olmaktadır. Mukavemeti yüksek parçalar üretilebilmektedir. Diğer yöntemlerin aksine, basılan ürüne destek yapılması gibi bir duruma gerek bulunmamaktadır. Üretim işlemi bittikten sonra parçanın hasarlanmaması için soğuması gerekmektedir. Bu da zaman açısından bir dezavantaj ortaya çıkarmaktadır [66,67].



Şekil 2.27 : Seçici lazer sinterleme çalışma prensibi [65].

2.3.1.4 Polyjet

Polyjet yöntemi SLA yöntemi ile benzer bir yöntemdir. Şekil 2.28’de çalışma prensibi verilen bu sistem ile X, Y ve Z ekseninde de hareket edebilen baskının yapılacağı yüzeye fotopolimer reçineler püskürtülerek UV ışını ile kürleştirilmektedir.

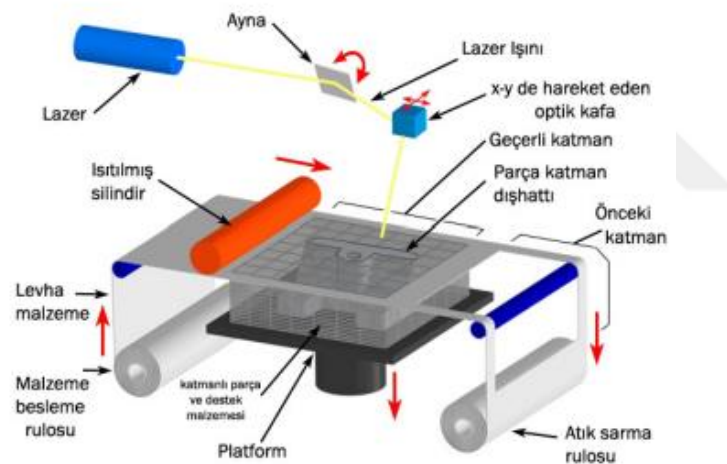


Şekil 2.28 : Polyjet çalışma prensibi [65].

Her bir katman oluştuğunda, sistem Z ekseninde bir katman boyutu kadar aşağı inmektedir ve bu şekilde tüm katmanlar tamamlandığında destek malzemesi de sistemden arındırılarak ürün tamamlanmış olmaktadır. Bu yöntemde çok fazla malzeme seçeneği bulunmaktadır. Aynı zamanda kaliteli yüzey, sıcaklığa dayanıklılık, sertlik gibi özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. Fakat diğer yöntemlere göre daha düşük mukavemetli ürünler elde edilmektedir [66,68].

2.3.1.5 Tabakalı yapıştırırmalı parça imalatı (LOM)

LOM çalışma prensibine ait görsel Şekil 2.29’da verilmektedir. LOM yönteminde katmanları birbirine yapıştırmak için kullanılan bir silindir, lazer, ayna ve bir optik kafa bulunmaktadır. Metal, seramik katkılı, kağıt, plastik gibi malzemelerle üretim yapılabilen bu yöntemde, malzeme bir rulo gibi sarılmaktadır. Platform üstüne malzeme yerleştirildiğinde lazer silindir ile ısıtma işlemi yapılmaktadır. Lazer ile sisteme aktarılmış olan CAD modeli işlenmektedir. Gerekli kesim işlemi yapıldığında, platform Z ekseninde bir katman kalınlığı kadar aşağı iner. Rulo ileri sarılır ve yeni bir katman tabla üstüne serilmiş olmaktadır. Aynı işlemler katmanlar tamamlanana kadar devam edererek en son model etrafında kalan fazla parçalar da çıkartılarak ürün tamamlanmış olmaktadır. Malzemelerin ucuz olması, hızlı bir işlem olması, hassasiyetinin yüksek olması, işlevsel ürünler elde edilebiliyor olması bu sistemin dezavantajları arasında bulunmaktadır [66].

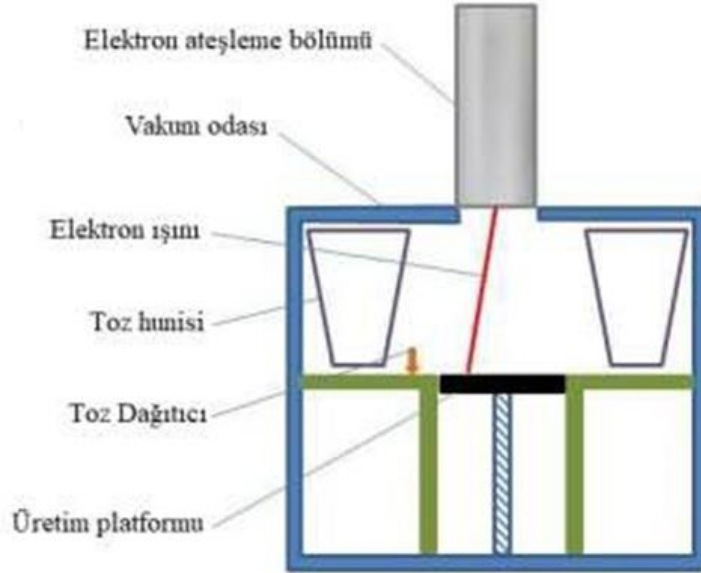


Şekil 2.29 : Tabakalı yapıştırırmalı parça imalatı çalışma prensibi [65].

Bununla birlikte, daha düşük yüzey kalitesine sahip ürünler üretilmektedir ve boyutsal doğruluğu, toz yatağı yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Ayrıca, ürün tamamlandıktan sonra destek parçalarının temizlenmesi zaman alabilmektedir. Karmaşık şekiller için de tavsiye edilmemektedir.

2.3.1.6 Elektron ışınlı ergitme (EBM)

EBM yönteminde tablaya yerleştirilen metal veya seramik kumlar ön ısıtmaya tabi tutulurarak daha sonra istenilen geometriye göre kumların üzerine elektron ışınları gönderilmektedir. Bu elektron ışınlarının kinetik enerjisinin, termal enerjiye dönüşmesiyle kullanılan toz malzemeler eriyerek bir katılaşma süresi geçtikten sonra tabla Z ekseninde aşağı doğru bir katman kadar inmektedir. Aynı işlem tüm katmanlar bitene kadar devam etmektedir. Bu yöntem sayesinde mukavemeti yüksek, yüksek hassasiyete sahip, korozyon direnci yüksek ve düşük yoğunluğa sahip ürünler elde etmek mümkündür [66, 67]. Ayrıca hızlı bir üretim yöntemi olmakla beraber vakum kullanıldığı için gaz problemleri de yaşanmamaktadır [69]. Şekil 2.30'de EBM çalışma prensibine ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.30 : Elektron ışınlı ergitme çalışma prensibi [69].

2.3.2 Üç boyutlu yazıcıların uygulama alanları

Üç boyutlu yazıcılar, gelmiş olduğu nokta ve sağladığı kolaylıklar ile günümüz endüstrisinde nerdeyse her sektörde kullanılmaktadır. Üç boyutlu yazıcı ile prototip üretilmesi, kişiye veya bir ürüne özel baskı alınabilmesi gibi avantajlar üç boyutlu yazıcı kullanımını her sektörde yaygınlaştırmıştır.

Otomotiv sektöründe pek çok marka üç boyutlu yazıcı teknolojisini bünyesinde bulundurmaya başlamıştır. Örneğin Honda, Audi gibi markalar yedek parça üretiminde, far üretiminde, kişiye özel taleplerde veya ürettikleri arabalarda seri

üretime gerek duyulmayan özel parçalarda üç boyutlu yazıcı teknolojisinden faydalanmaktadır.

Porsche ise yakın zamanda üç boyutlu yazıcı ile daha hafif ve ısınma problem olmayan piston ürettiğini açıklamıştır. Bu piston örneklerinden biri Şekil 2.31’de verilmektedir [70].



Şekil 2.31 : Porsche’nin üç boyutlu yazıcı ile ürettiği piston örnekleri [70].

Döküm veya kalıplama gibi sektörlerde prototip üretmek için üç boyutlu yazıcıların kullanımı artmıştır. Sağlamış olduğu maliyet, zaman, kolaylık gibi avantajlar üç boyutlu yazıcı kullanımının artmasını sağlamıştır.

Medikal alanda ise kişiye özel olarak üretilen protezlerde kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Organ üretimi için ise hala üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Tel Aviv Üniversitesi’nde yürütülen bir çalışmada üç boyutlu yazıcı ile hastadan alınan doku malzemesi kullanılarak bir kalp üretilebildi ancak kalbin henüz kalp pompalama işlevi bulunmamaktadır. İlerleyen yıllarda ise bu gelişmeler sayesinde organ üretiminin, organ nakli bekleyen insanlar için önemli bir noktaya geleceği düşünülmektedir [71]. Şekil 2.32’de üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kalp görseli verilmektedir.



Şekil 2.32 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş kalp [71].

Dental alanda da üç boyutlu yazıcıların kullanımı oldukça yaygındır. Diş teli, diş protezi gibi kişiye özel hassasiyetle yapılması gereken ürünlerin, yazıcılar vasıtasıyla hem çok daha hassas doğrulukta hem de çok kısa zamanda yapılması bu yazıcıların kullanımını artırmıştır [72]. Şekil 2.33’de üç boyutlu yazıcı ile basılmış bir diş modeli verilmektedir.



Şekil 2.33 : Üç boyutlu yazıcı ile basılmış bir diş modeli [72].

Şekil 2.34’de mühendislik ve mimarlık alanında üç boyutlu yazıcı örnek uygulamaları verilmektedir. Üç boyutlu yazıcılar prototip üretimi ve duruma, kişiye özel üretim yapılabilme gibi kabiliyetler sayesinde mimarların modellerini gerçek haliyle maket olarak görebilmeyi, mühendislerin üretecekleri ürünlerin prototipini önceden görüp durum değerlendirmesi yapabilmeyi kolaylaştırmaktadır [73].



Şekil 2.34 : Üç boyutlu yazıcı ile basılmış mühendislik malzeme örnekleri [73].

Bu alanlar haricinde üç boyutlu yazıcılar ile kuyumculuk sektöründe aksesuar üretimi, gıda sektöründe çikolatadan şekil üretimi gibi daha birçok alanda üretim yapılabilmektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Sandviç yapılar sahip oldukları geliştirilebilir mekanik özellikler ve sağlamış oldukları mükemmel özelliklerden dolayı birçok mühendislik ve uygulama alanında kullanılan malzemeler haline gelmiştir. Sandviç yapılarda yapının mukavemet ve enerji sönümleme kabiliyeti çoğunlukla çekirdek geometrisine ve yapısına bağlı olmaktadır [74].

Sandviç yapılar ile ilgili yapılan çalışmalarda 1987 yılında Lake sıcaklık ve üç yönlü sıkıştırma ile elde edilen yeniden kırılgan Poliüretan köpüklerde negatif poisson oranı etkisini keşfetmiş olup öksetik malzemeler ortaya çıkmıştır. Daha sonra bu malzemeler üzerine farklı birçok çalışma yapılarak çok fazlı öksetik üretimi gibi diğer öksetik malzemelerin üretimi geliştirilmiş ve modifiye edilmiştir [75]. Öksetik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar köpükler ile sınırlı kalmamış olup metaller, polimerler, tekstil kompozitleri, seramikler ve biyomalzemeler gibi tüm ana sınıfları kapsayan çok çeşitli yapay öksetik malzemeler bilinçli olarak üretilmeye başlanmıştır.

Geleneksel üretim yöntemler sadece düzenli öksetik malzemelerin üretimine olanak sağladığından dolayı istenilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip farklı geometrilerdeki öksetik malzemelerin üretilmesini zorlaştırmıştır. Eklemeli imalat yöntemi ile farklı geometrilere sahip sandviç yapıların eldesine ait çalışmalar yapılmıştır. Literatürde sandviç yapılar ve çekirdek geometrileri ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışma konusuyla ilgili önemli araştırmalar ve çalışmalar bu bölümde kısaca verilmektedir.

Ingrole ve çalışma arkadaşları ABS malzemesinden eklemeli imalat yöntemiyle üretilen modifiye edilmiş öksetik bal peteği ve yeniden kıvrımlı öksetik birim hücreleri üzerine yapmış oldukları çalışmada yapıların şekil değişimlerini, hata mekanizmalarını ve mekanik performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada modifiye edilmiş öksetik birim hücre yapısının öksetik birim hücre yapısı ve yeniden kıvrımlı öksetik birim hücre yapısına göre basma dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen bir sonucun da modifiye edilmiş öksetik yapının yeniden kıvrımlı öksetik yapıya göre daha fazla enerji sönümleme

olmuştur. Bu çalışma ile öksetik yapıların birim hücre şeklinin değiştirilerek mekanik davranışların ayarlanabileceğine atıfta bulunulmuştur [76].

Mohsenizadeh ve diğerleri iki farklı polimerik malzemeden farklı yoğunluklarda hafif metamalzemeler STL eklemeli imalat ile üreterek basma testi uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre basma testiyle %70 birim uzama değerine kadar numunelerin elastik şekil değiştirebildikleri ve bu hafif metamalzemelerin polimerik köpüklere kıyasla daha yüksek enerji sönümleyebildiklerini göstermişlerdir [77].

Liao ve çalışma arkadaşları farklı ağırlık oranlarında sürekli karbon takviyeli PA12 peletlerin ergitilerek ekstrüzyon işlemiyle eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılmak üzere filament üretimi gerçekleştirerek farklı ağırlık oranlarının üç nokta eğme testi ve darbe testi gibi mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlara göre %10 karbon fiber içeren PA12 kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımının saf PA12 numunelere göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [78].

Chen ve arkadaşları üçgen kafes yapıları yerleştirilerek oluşturmuş oldukları hiyerarşik bal peteği hücre yapısının basma yükü altındaki mekanik özellikleri incelemişlerdir. Polijet ile üretilen eşit izafi yoğunluğa sahip hiyerarşik bal peteği ve normal bal peteğinin basma testleri karşılaştırıldığında hiyerarşik yapının normal yapıya göre daha fazla rijitlik ve enerji sönümleme kabiliyetini sergilediklerini göstermişlerdir [79].

Solmaz ve diğerleri altıgen bal peteği hücre yapısına sahip sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve kırılma yüzeylerinin incelenmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelerin yüzey plakaları polyester cam fiber tabakalı kompozit olup iç çekirdek kısmında ise PLA ve ABS termoplastik malzemeler kullanılıp eklemeli imalat yöntemiyle numune üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada farklı hücre boyutlarına ve hücre yüksekliklerine sahip numunelere eksenel basma kuvveti uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hücre yoğunluğunun artmasıyla kritik burkulma yük değeri artarken hücre yüksekliğinin artmasıyla kritik burkulma değerinin azaldığı gözlemlenmiştir [80].

Li ve Wang eklemeli imalat yöntemiyle çekirdek üretimi gerçekleştirip oluşturulan kompozit yapıların eğilme davranışını incelemişlerdir. Çekirdek üretiminde akrilik fotopolimer olan VeroWhite malzemesinden polijet yöntemiyle geleneksel bal peteği ve yeniden kırıli bal peteğinden öksetik yapılar oluşturmuşlardır.

Yüzey plakalardokuma karbon fiber takviyeli polimer ve tek yönlü karbon fiber takviyeli polimer ve VeroWhite malzemelerinden üretilmiştir. İki adet yüzey plakası ve çekirdeğin birbirine reçine epoksi reçine ile yapıştırılarak elde edilen kompozit malzemelere üç nokta eğme testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tek yönlü karbon fiber takviyeli polimer yüzey plakasıyla oluşturulan numunenin VeroWhite malzemeli yüzey plaka numunesine kıyasla daha fazla eğilme dayanımına ve eğilme rijitliğine ve enerji sönümleme performansı göstermiştir [81].

Li ve diğerlerinin eklemeli imalat ve öksetik yapılar üzerine yapmış oldukları bir çalışmada ise öksetik kiriş yapılarının kullanıldığı sandviç yapıların enerji emebilme kapasitelerini ve sertlik değerlerini sonlu analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kiriş yapılarda öksetik mekanizma yapısının enerji sönümleme kabiliyetinde önemli derecede artışın meydana geldiğini ve öksetik mekanizmaların konfügürasyonu ile enerji sönümleme kabiliyetlerinin arttırılabileceğini ortaya koymuşlardır [82].

Alomarah ve arkadaşları farklı öksetik çekirdek geometrilerinin baskı yükü altındaki mekanik özelliklerini ve enerji sönümleme kabiliyetlerini deneysel ve sonlu analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre farklı poisson oranına sahip öksetik çekirdek geometrileriyle üstün enerji sönümleme kabiliyetine sahip yapıların elde edilebildiğini ve farklı hücre boyutlarındaki konfigürasyonlar ile enerji sönümleme kabiliyetlerini çok daha ileri seviyeye çıkarabileceklerini göstermişlerdir [83].

Chao ve diğerleri sürekli fiber katkılı öksetik termoplastik kompozitler üzerinde üç boyutlu yazıcıda spesifik bir baskı yolu ile üreterek inceleme yapmışlardır. Cam fiber katkısının etkisini karşılaştırmak amacıyla aynı yolla saf Polilaktik asit numunelerin de üretimini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen numunelerin kırılma yüzeyleri SEM mikroskop altında incelenerek poisson oranlarını tahmin etmek için sonlu analiz yöntemi kullanmışlardır. Karbon fiber katkılarının petek yapı içinde çatlak yayılımını engellediği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca karbon fiber ilavesiyle yapının enerji sönümleme ve sertlik değerlerinin arttığı sonucunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile sürekli karbon fiber takviyeli hafif yapıların entegre imalatında büyük ve kompleks şekiller için işlevsel mekanik özellikler elde edilebileceğini sunmuşlardır [84].

Tahgizadeh ve diğerkleri farklı oluklu çekirdek konfigürasyonlara sahip sandviç panel kompozit yapılarda çok katmanlılığın etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Eşit ağırlık oranına sahip kompozit plakalar ve oluklu çekirdekler sertleştirilmiş reçine ve cam fiber kullanılarak manuel olarak numuneler hazırlamışlardır. Dikdörtgen, yamuk ve üçgen şeklinde farklı oluklu çekirdek yapılardan elde edilen kompozit numunelerin enerji sönümleme kabiliyetleri ve kırılma mekanizmalarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sandviç panellerin çok katmanlı olmasının kompozit yapıların sadece mukavemetini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda kompozit yapının darbe durumunda dislokasyon yer değişimini artırarak yapının enerji sönümleme kabiliyetini de arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır [85].

Günaydın ve çalışma arkadaşları anti tetrakiral ve modifiye edilmiş yeniden kırışlı kafes yapılara sahip kompozitleri deneysel ve numerik olarak karşılaştırma çalışmaları yapmışlardır. Numuneleri ait kafes yapıları ergiyik biriktirerek modelleme ile üreterek yarı statik şartlarda darbe testi uygulamışlardır. Numunelere sonlu eleman modeli uygulayarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre anti terakiral yapıya sahip kompozitlerin yeniden kırışlı kafes yapılarına kıyasla daha yüksek enerji sönümleyebilme yeteneğine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Akustik özelliklerin yanı sıra anti tetrakiral kafeslerin çarpışma şartlarında iyi bir deformasyon mekanizması sergilediklerini ortaya koymuşlardır [86].

Hu ve çalışma arkadaşları ABS polimerden yapılan yeniden kırışlı anti trikiral petek yapıların yarı statik mekanik özellikleri hem deneysel yöntemler ile hem de teorik analizler ile incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre bal petek yapılarının deformasyonun hücre yapılara bağlı olarak değişti sonucuna ulaşmışlardır. Petek yapıların ezilmelerinin hücre duvarı ve bağ-uzunluk oranı ile azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [87].

Qi ve çalışma arkadaşları yenilikçi yeniden kırışlı öksetik hücre yapılarının geleneksel kırışlı hücre yapılarına göre daha iyi mekanik özellikle ve enerji sönümleme yeteneğini sağladıklarını sunma amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmada farklı geometrik yapılara sahip yenilikçi yeniden kırış yapıların yarı statik ezilme dayanımları ve enerji sönümleme yeteneklerini sonlu eleman analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Farklı geometrik parametrelere sahip yenilikçi yeniden kırış öksetik yapıların statik yük altında gösterdikleri mukavemetin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [88].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan tez çalışmasında ilk olarak FDM yöntemi kullanılarak üretilen ABS ve PC/ABS numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenerek kompozit yapının homojen malzeme ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bir sonraki aşamada ise ABS ve PC/ABS öksetik geometrili sandviç yapıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

4.1 Kullanılan Malzemeler

Üç boyutlu yazıcılarda baskılanabilirlik, dayanım, tokluk, sertlik, termal direnç ve maliyet filament seçiminde önemli kriterler olup yaygın olarak kullanılan iki malzeme PLA ve ABS malzemeleridir. Otomotiv sektöründe yaygınca kullanılan polimer malzemelere ilişkin darbe dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin ve yanmazlık özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi amacıyla bu çalışmada ABS ve PC/ABS malzemeleri seçilmiştir. Piyasada birçok firmanın ticari olarak tedarikini sağladığı ABS ve PC/ABS filamentler bulunmaktadır. Bu filamentlerin mekanik özellikleri arasında belirgin farklılıklar bulunmamaktadır. Yapılan tez çalışmasında Basf Ultrafuse marka 1,75 mm ABS ve PC/ABS filamentleri tercih edilmiştir. Basf Ultrafuse marka ABS malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : ABS malzemesinin mekanik özellikleri.

Özellikler	ABS
Yoğunluk (g/cm ³)	01.03-1.08
Elastik modülü (MPa)	1697-2826
Gerilme direnci (MPa)	32-53
Çekme dayanımı kırılma (MPa)	15-50
Çekme uzama verim (%)	2-21
Çekme uzama kırılması (%)	0.90-57
Eğilme modülü (MPa)	1420-2770
Bükülme mukavemeti (MPa)	44.6-89
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	100
Ergime sıcaklığı (°C)	210-240

Deneyleerde kullanılan ABS filamentin genel özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Deneyleerde kullanılan ABS filamentin genel özellikleri.

Özellikler	Değer
Form	Katı
Suda çözünabilirlik	Yok
Yoğunluk (g/cm ³)	1,04
Baskı sıcaklığı (°C)	240-260
Baskı tabla sıcaklığı (°C)	90-110
Ergiyik akış hızı (260 °C, 5 kg) (cm ³ /10 dk)	24,2
Isıl bozulma sıcaklığı (0,45 MPa) (°C)	79
Gerilme direnci (MPa)	36,3
Kopma uzaması (%)	7,4
Bükülme mukavemeti (MPa)	56,6
IZOD darbe dayanımı (MPa)	40

Deneyleerde kullanılan Basf Ultrafuse marka PC/ABS filamentinin genel özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

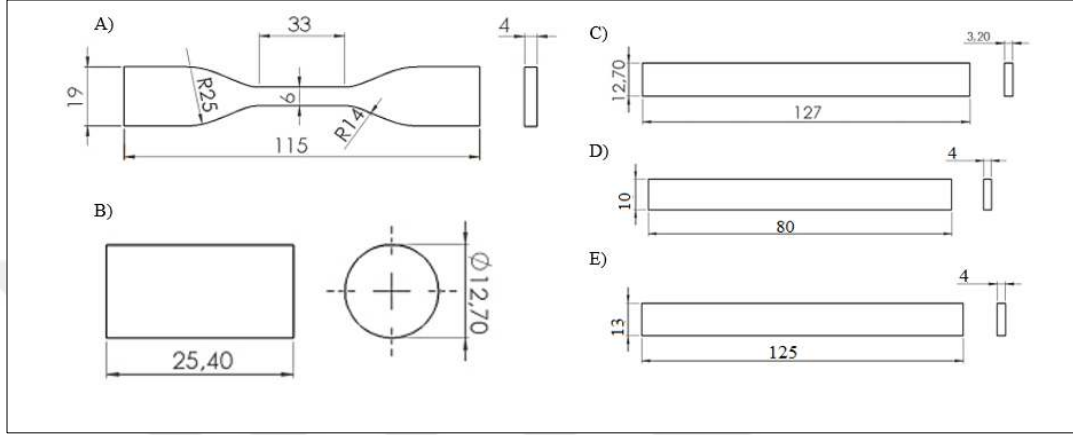
Çizelge 4.3 : PC/ABS malzemesine ait genel özellikler.

Özellikler	Değer
Form	Katı
Suda çözünabilirlik	Yok
Yoğunluk (g/cm ³)	1.17
Baskı sıcaklığı (°C)	240-260
Baskı tabla sıcaklığı (°C)	90-110
Ergiyik akış hızı (260 °C, 5 kg) (cm ³ /10 dk)	46,6
Isıl bozulma sıcaklığı (0,45 MPa) (°C)	86
Gerilme direnci (MPa)	50,1
Kopma uzaması (%)	10,7
Bükülme mukavemeti (MPa)	88,1
IZOD darbe dayanımı (MPa)	57

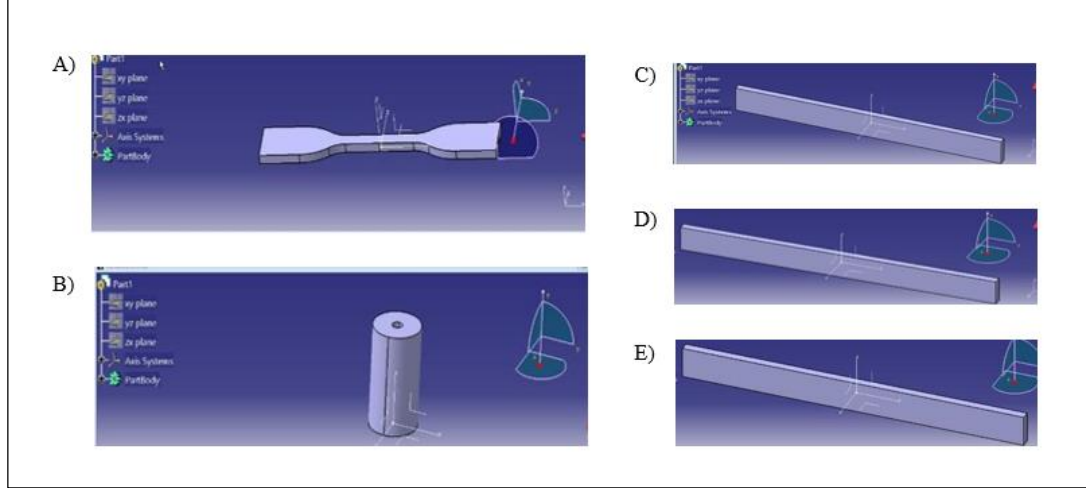
4.2 Numunelerin Tasarımı

Bu tez kapsamında FDM yazıcıdan üretilecek parçalara ait mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için ASTM D638-14 standardına uygun çekme numuneleri, ASTM D695-15 standardına göre basma numuneleri ve ASTM D790-17 standardına göre üç nokta eğilme numuneleri, ISO 179-2 standardına göre darbe numuneleri ve UL-94

standardına göre yanmazlık test numunleri tasarlanmıştır. Standartlara göre ölçüleri belirlenen numunelerin CAD çizimleri Solidworks programında hazırlanmıştır. Numunelere ait ölçüler ve Solidworks tasarımları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmektedir. Tasarımlar üç boyutlu yazıcıların çalışması için gerekli olan dilimleyici programlara aktarılabilmesi için Solidworks programı kullanılarak STL formatına dönüştürülmüştür.



Şekil 4.1 : Mekanik deneylerde kullanılan malzemelerin teknik resimlerin a) çekme b) basma c) üç nokta eğilme d) darbe e) yanma test numuneleri ölçümleri.



Şekil 4.2 : Mekanik deneylerde kullanılan malzemelerin a) çekme b) basma c) üç nokta eğilme d) darbe e) yanma test numunelerinin Solidworks tasarımları.

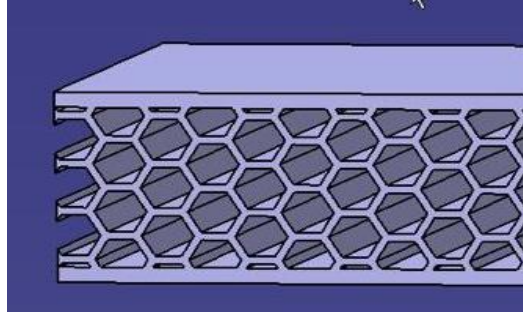
4.3 Sandviç Yapıların Tasarımı ve Üretimi

Günümüzde ileri mühendislik malzemelerde yaygınca kullanılan sandviç kompozit yapılarda çekirdek geometrisi ve yapısının kompozit yapının mukavemet ve enerji sönümlene kabiliyetine doğrudan etkisinin bulunduğu bilinmektedir. Sahip oldukları düşük yoğunluğa karşılık göstermiş oldukları yüksek mukavemet, darbe direnci, sertlik gibi mükemmel mekanik özelliklerden dolayı ve üretimin nispeten kolay olması sebebiyle balpeteği çekirdek geometri yapısı oldukça tercih edilmektedir. Daha yüksek mukavemet ve enerji sönümlene yeteneğiyle öne çıkan öksetik malzemelerin üretimi geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi nispeten zor olduğundan dolayı çok tercih edilmemiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımının yaygınlaşmasıyla bu malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ve gelişmeler artarak hız göstermiştir [89].

Yapılan bu tez çalışmasında öksetik geometriye sahip sandviç yapıların mekanik dayanımlarının ve enerji sönümlene kabiliyetlerinin geleneksel balpeteği çekirdek geometrisine kıyasla ne kadar etkili olduklarını belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla geleneksel altıgen balpeteği çekirdek yapıya sahip yapı ile öksetik çekirdek geometrisine sahip tetrachiral ve çift ok kafa yapı numuneleri tasarlanmıştır. Tasarımı Solidworks programıyla ASTM D7336/D7336M-16 ve ASTM C393/C393M-16 standartlarına uygun numuneler elde edecek şekilde tasarımı yapılmıştır.

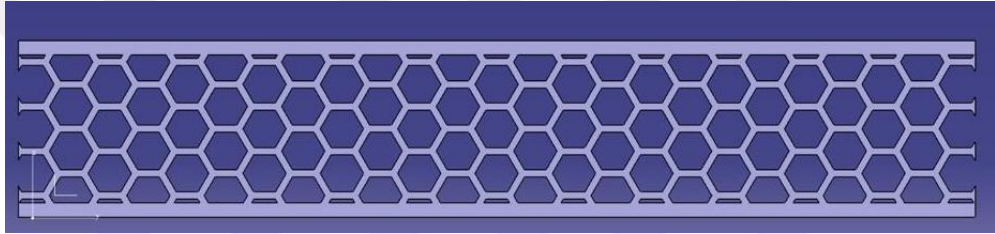
4.3.1 Altıgen balpeteği çekirdek yapıya sahip malzemenin tasarımı

En yaygın kullanılan ve bilinen çekirdek geometrisi altıgen balpeteği geometrisidir. Doğal geometrisinden kaynaklı yüksek mekanik özellikleri kullanılmasının temel sebebidir. Yapılan bu çalışmada da altıgen balpeteği geometrisinin, öksetik çekirdek geometrileriyle kıyaslamak için en iyi geleneksel yapılardan biri olduğu kabul edilmiş ve bu geometriye ait tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan altıgen balpeteğine ait tek hücre geometrisi hücre boyutu 10,80 mm, hücre genişliği 9,05 mm ve duvar kalınlığı 1,50 mm ölçülerinde olup ASTM D7336/D7336M-16 standardına uygun hazırlanan basma numunesine ait test numunesinin ölçüleri 75 mm x 75 mm x 37 mm olmakla birlikte alt ve üst plaka kalınlıkları 3 mm'dir. Solidworks tasarımı Şekil 4.3' de verilmektedir. Altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip basma numunesinin hesaplanan izafi yoğunluğu 0,410'dur.



Şekil 4.3 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numenin Solidworks tasarımı.

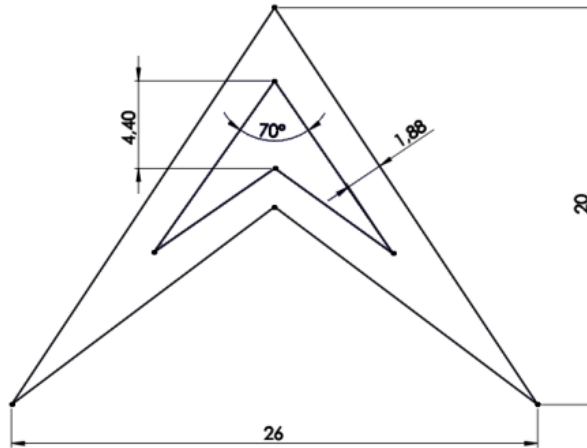
ASTM C393/C393M-16 standardına göre üç nokta eğme testi için ölçüleri 50 mm x 200 mm x 37 mm olup alt ve üst yüzey plaka kalınlığı 3 mm olan aynı balpeteği geometriye sahip numuneye ait Solidworks tasarımı Şekil 4.4’de verilmektedir.



Şekil 4.4 : ASTM C393/C 393M-16 standardına göre tasarlanan altıgen balpeteği çekirdek geometrisine sahip numenin Solidworks tasarımı.

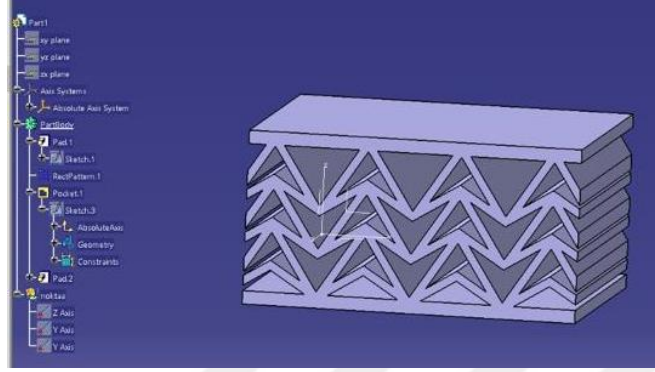
4.3.2 Çift ok kafa çekirdek yapıya sahip malzemelerin tasarımı

ASTM D7336/D7336M-16 standardına uygun hazırlanan çift ok kafa çekirdek numunesine ait çekirdek geometrisi Şekil 4.5’de verilmektedir.



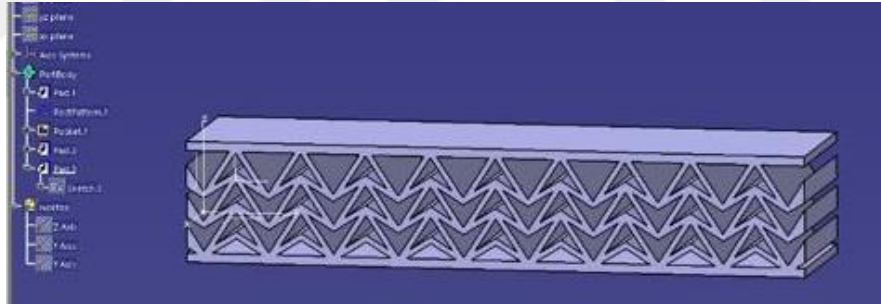
Şekil 4.5 : Çift ok kafa çekirdek geometrisine ait hücre ölçüleri [41].

ASTM D7336/D7336M-20 stadardına uygun hazırlanmış basma test numunesinin ölçüleri 75 mm x 75 mm x 37 mm olmakla birlikte alt ve üst plaka kalınlıkları 3 mm'dir. Solidworks tasarımı Şekil 4.6' de verilmektedir. Çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,519'dur.

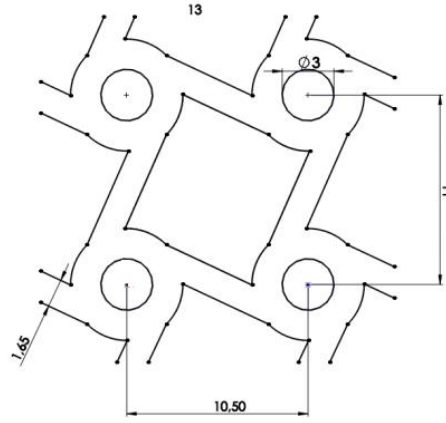


Şekil 4.6 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.

ASTM C393/C393M-16 standardına göre hazırlanan numuneye ait Solidworks tasarımı Şekil 4.7' de verilmiştir. Kullanılan numune ölçüleri 50 mm x 200 mm x 39 mm olup alt ve üst yüzey plaka kalınlıkları 3 mm'dir.

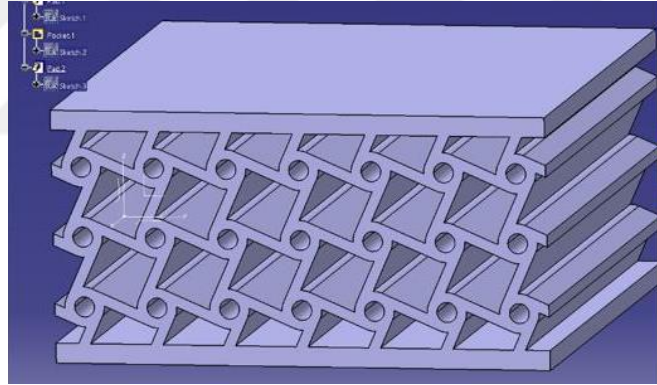


Şekil 4



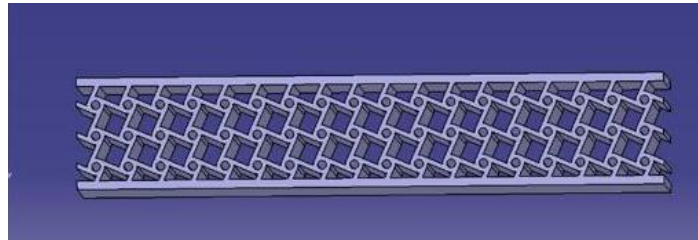
Şekil 4.8 : Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip hücrelerin ölçümleri [41].

ASTM D7336/D7336M-20 stadardına uygun hazırlanmış basma test numunesinin ölçüleri 75 mm x 75 mm x 37 mm olmakla birlikte alt ve üst plaka kalınlıkları 3 mm'dir. Solidworks tasarımı Şekil 4.9' da verilmektedir. Tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin izafi yoğunluğu 0,475'dir.



Şekil 4.9 : ASTM D7336/D7336-20 standardına göre tasarlanan tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.

Aynı geometriye sahip ASTM C393/C393M-16 standardına göre hazırlanan eğme numunesine ait Solidworks tasarımı Şekil 4.10' da verilmiştir. Kullanılan numune ölçüleri 50 mm x 200 mm x 39 mm olup alt ve üst yüzey plaka kalınlıkları 3 mm'dir.



Şekil 4.10 : ASTM C393/C393M-16 standardına göre tasarlanan tetrachiral çekirdek geometrisine sahip numunenin Solidworks tasarımı.

4.4 Numunelerin Üretimi

Mekanik deney numunelerinin üretimi Ergiyik Yığın Modelleme (FDM) tipi üç boyutlu yazıcı olan Ultrafuse marka yazıcıda üretilmiştir. Numunelerin üretiminin gerçekleştirildiği FDM yazıcı Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Ürünlerin 3B yazıcı ile üretilmesinde 3Dörtgen firmasından destek alınmıştır.



Şekil 4.11 : Numunelerin üretiminin gerçekleştirildiği FDM yazıcı görseli [90].

Solidworks programında çizilen modeller daha sonra STL formatına getirilerek, Cura programında dilimleme işlemi yapılmıştır. Buradan da 3B yazıcılara modeller aktarılmıştır. Kullanılan ABS ve PC/ABS malzemelere ait yazıcı parametreleri sırasıyla Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de verilmektedir.

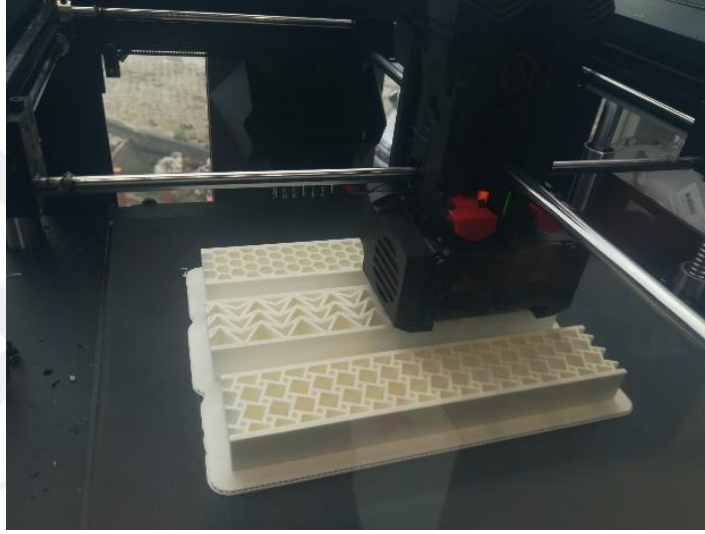
Çizelge 4.4 : ABS malzemesine ait FDM yazıcı parametreleri.

Özellikler	Değer
Nozul sıcaklığı (°C)	240-260
Baskı tabla sıcaklığı (°C)	100-120
Fan hızı (%)	0
Baskı hızı (mm/sn)	40-80
Alt/üst kalınlık (mm)	0,8-1,0
Katman yüksekliği (mm)	0,1-0,2

Çizelge 4.5 : PC/ABS malzemesine ait FDM yazıcı parametreleri.

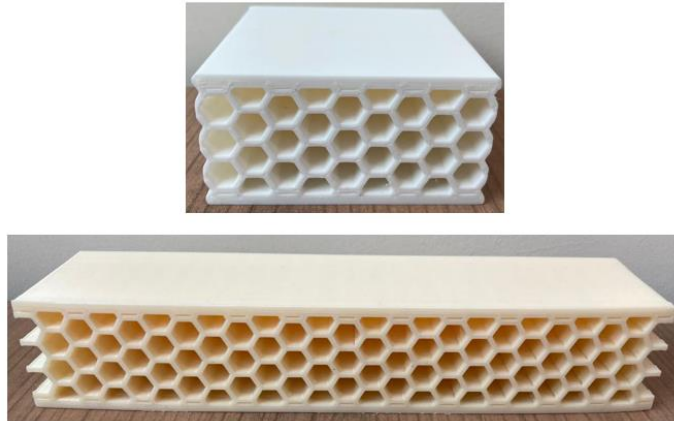
Özellikler	Değer
Nozul sıcaklığı (°C)	260-280
Baskı tabla sıcaklığı (°C)	90-110
Baskı hızı (mm/sn)	30-50
Alt/üst kalınlık (mm)	0,8-1,0
Katman yüksekliği (mm)	0,1-0,2

Baskı parametreleri ve tasarım ölçümleri belirlenen numunelerin FDM yazıcıda basım aşamasını gösteren görsel Şekil 4.12’de verilmektedir.

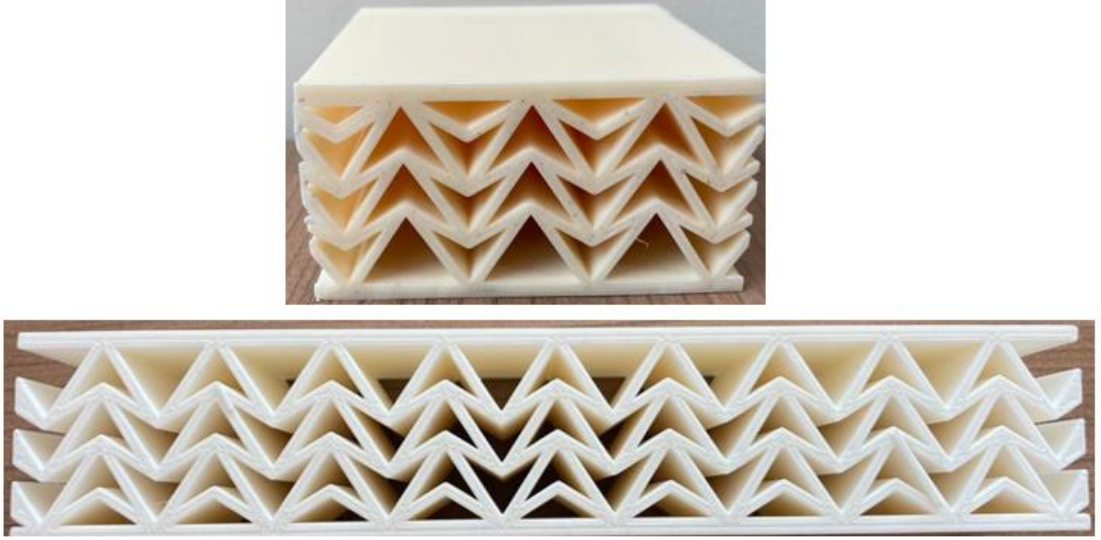


Şekil 4.12 : Numunelerin baskı aşamasının görseli.

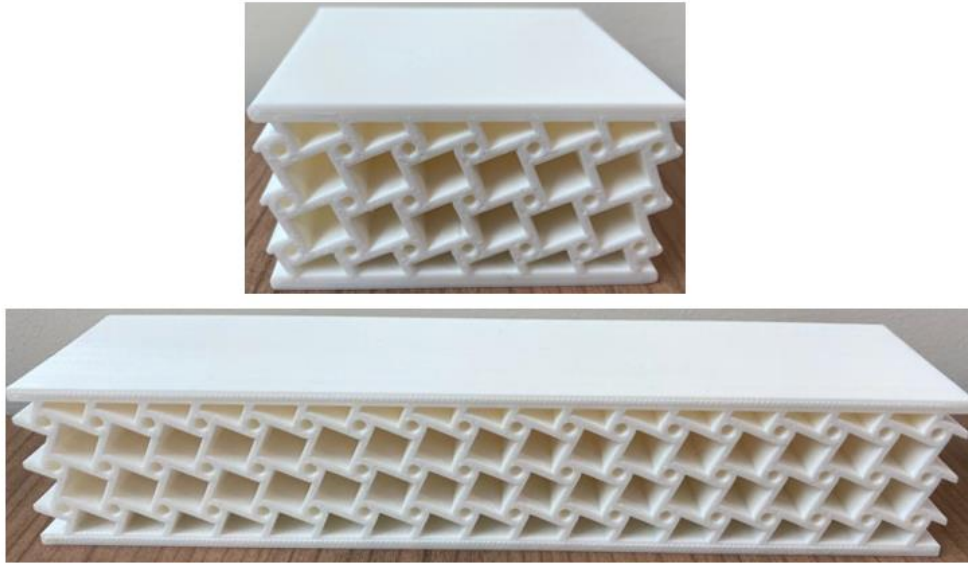
Üretilen numunelere ait görseller Şekil 4.13’de altıgen balpeteği yapıya sahip sandviç test numunelerini, Şekil 4.14’de çift ok kafa yapıya sahip sandviç test numuneleri ve Şekil 4.15’ de tetrachiral yapıya sahip sanviç test numuneleri verilmiştir.



Şekil 4.13 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş altıgen balpeteği yapıya sahip sandviç test numuneleri.



Şekil 4.14 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş çift ok kafa yapıya sahip sandviç test numuneleri.



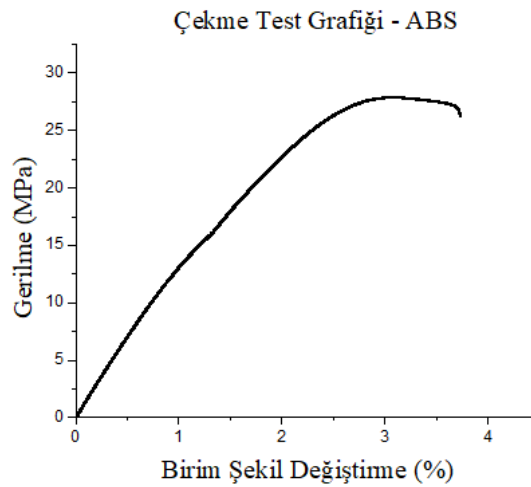
Şekil 4.15 : Üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş tetrachiral yapıya sahip sandviç test numuneleri.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

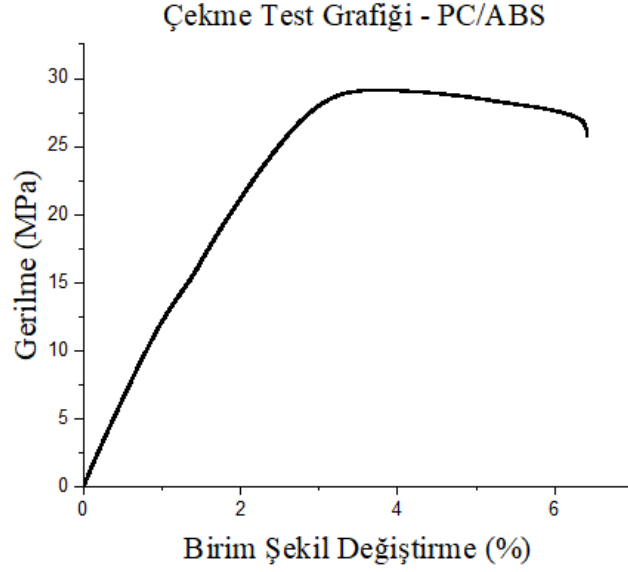
Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar bu bölümde sunulmuş ve elde edilen bulgular üzerine tartışmalar yapılmıştır. İlk olarak ABS ve PC/ABS malzemelerden üretilmiş düz plaka yapılara çekme testi, basma testi, üç nokta eğme testi, darbe testi ve yanmazlık testi yapılmış olup PC/ABS kompozitin mekanik özellikleri saf ABS ile incelenerek karşılaştırılmıştır. Akabinde balpeteği, tetrakiral ve çift ok kafa çekirdek geometrilerine sahip ABS ve PC/ABS sandviç kompozit üretilerek basma ve üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Yapılan testler ile çekirdek geometrisinin sandviç yapının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

5.1 Çekme Testi Sonuçları

ASTM 638-14 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS çekme test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan SHIMADZU-AG-XPLUS mekanik test cihazı ile oda sıcaklığında ve 10 mm/dk sabit hız ile gerçekleştirilmiştir. ABS ve PC/ABS filamentlerinden üretilmiş düz plaka yapılara uygulanan çekme test sonuçları sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.1 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait çekme test grafiği.



Şekil 5.2 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait çekme test grafiği.

Tez çalışmasında 5'er adet ABS ve PC/ABS düz plaka numunelere uygulanan çekme testi sonuçlarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Ort. Elastik Modülü (MPa)	Ort. Mak. Gerilme (MPa)	Ort. Kopma Gerilme (MPa)	Ort. Kopma Uzunluğu (%)
ABS	1001,50	27,79	26,57	3,72
PC/ABS	1227,24	29,09	25,90	6,42

Çekme testi sonuçları incelendiğinde ABS ve PC/ABS numuneleri için maksimum gerilme kuvvetlerinin sırayla 29,09 MPa ve 27,79 MPa, kopma uzunluklarının sırasıyla %6,42 ve %3,72 olduğu görülmüştür. FDM yazıcı ile üretilmiş düz plaka numunelere ait mekanik özelliklerinin ABS ve PC/ABS filamentlerinin mekanik özelliklerine kıyasla daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. FDM yazıcının yazıcı parametrelerinin etkisi olduğu öngörülmektedir. ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin mekanik özellikleri incelendiğinde ABS malzemesine PC ilavesiyle maksimum gerilme ve elastik modülünün arttığı ve sonuç olarak daha mukavemetli bir yapının elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda kopma yüzdesindeki artışın ABS malzemesine PC ilavesiyle yapının plastik davranışının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan literatür incelemelerinde FDM yazıcı ile katman kalınlığı, baskı hızı, baskı yönü, doluluk oranı gibi farklı yazıcı parametreleriyle üretilen ABS malzemelerinin mekanik özelliklerinde değişkenliğe sebep olduğu tespit edilmiştir [89]. FDM yazıcı

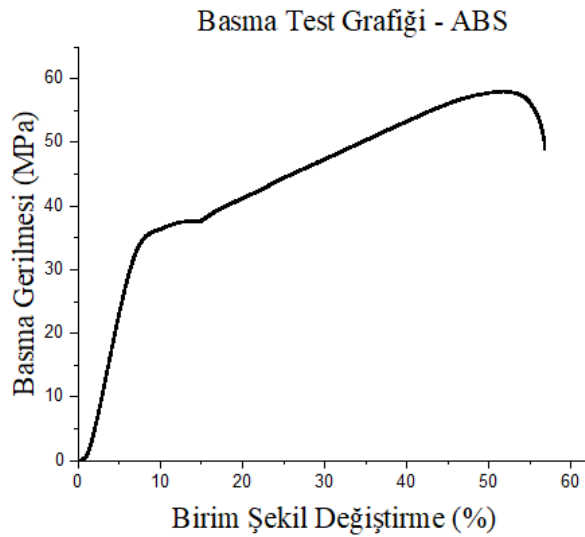
ile parametre değişikliklerinin PLA ve ABS malzemelere etkisi üzerine Panes ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, tabaka yüksekliğinin sabit tutularak doluluk oranının artmasıyla malzemenin mekanik özelliklerinin arttığı ve baskı yönünün mekanik özelliklere doğrudan etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda aynı doluluk oranına sahip baskıda tabaka kalınlığının artmasıyla mekanik özelliklerinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [91].

Geleneksel enjeksiyon üretim ile FDM yazıcıda basılmış ABS malzemenin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasına dair bir diğer çalışmada, FDM ile yazılmış ABS malzemenin mukavemet değerlerinin enjeksiyon ile üretilmiş numuneye göre oldukça düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [92].

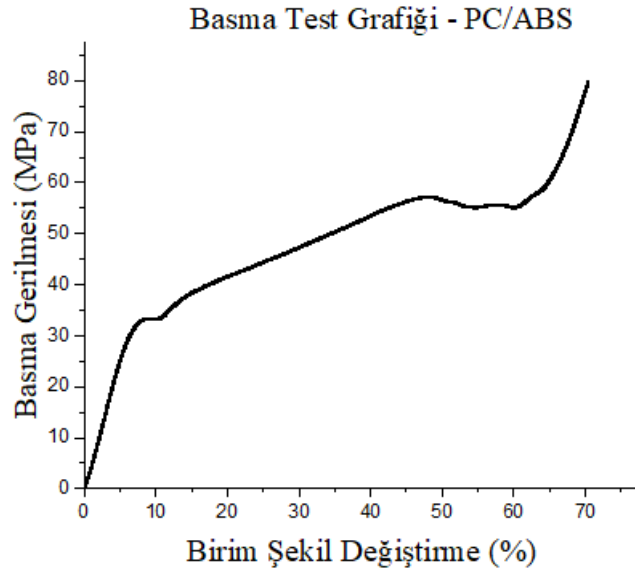
Elde edilen tez sonuçlarına ve yapılan literatür çalışmalarına göre uygun baskı parametreleri ve uygun malzeme seçimiyle kompleks parçaların üretilmesinde FDM yönteminin geleneksel üretimlere kıyasla daha çok tercih edilebileceği açıktır.

5.2 Basma Testi Sonuçları

ASTM D695-15 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS basma test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan SHIMADZU-AG-XPLUS mekanik test cihazı ile oda sıcaklığında ve 10 mm/dk sabit hız ile gerçekleştirilmiştir. ABS ve PC/ABS filamentlerinden üretilmiş düz plaka yapıları uygulanan basma test sonuçları sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verilmektedir.



Şekil 5.3 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait basma test grafiği.



Şekil 5.4 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait basma test grafiği.

Tez çalışmasında 5'er adet ABS ve PC/ABS düz plaka numunelere uygulanan basma testi sonuçlarının ortalama değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin basma testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Ort. Elastik Modülü (MPa)	Ort. Mak. Gerilme (MPa)	Ort. Kopma Gerilme (MPa)	Ort. Mak. Uzama (%)
ABS	614,57	57,93	49,85	51,78
PC/ABS	540,31	79,55	-	70,48

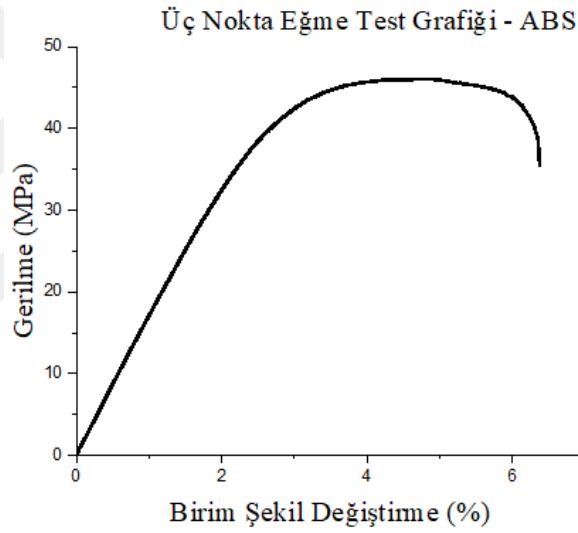
Basma test sonuçları incelendiğinde ABS ve PC/ABS düz plaka numuneleri için maksimum gerilme kuvvetlerinin sırasıyla 79,55 MPa ve 57,93 MPa, kopma yüzdelерinin %70,48 ve %51,78 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik özellikleri incelendiğinde PC/ABS malzemenin elastikliğinin azalmasına karşılık maksimum gerilme kuvvetinin arttığı görülmektedir.

Özsoy ve arkadaşlarının FDM ile PLA ve ABS yapılarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması çalışmasında katman kalınlığının, nozul sıcaklığının, filament doluluk oranının ABS ve PLA malzemeler üzerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre doluluk oranının artmasıyla mekanik özelliklerin arttığı ve en iyi mekanik özelliklerin PLA malzemedен üretilen numunelerde elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. ABS malzemesine ait ortalama maksimum gerilme ve ortalama uzama yüzdesi sırasıyla 22,38 MPa ve % 23,67 bulunmuştur [93]. Yapılan tez çalışmasında

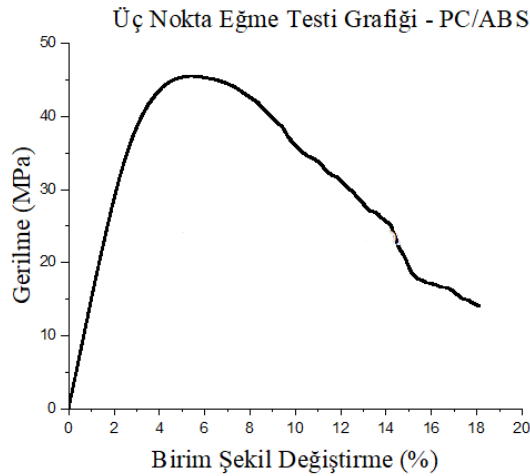
elde edilen ABS malzemesine ait gerilme ve ortalama uzama değerleri Özsoy ve arakdaşlarının elde ettiği sonuçları ile karşılaştırıldığında elde edilen farklılıkların filament ve yazıcı basma parametrelerinden kaynaklandığı öngörölmüştür.

5.3 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ASTM D790-17 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS basma test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan SHIMADZU-AG-XPLUS mekanik test cihazı ile oda sıcaklığında ve 5 mm/dk sabit hız ile gerçekleştirilmiştir. ABS ve PC/ABS filamentlerinden üretilmiş düz plaka yapılara uygulanan basma test sonuçları sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’de verilmektedir.



Şekil 5.5 : FDM yazıcı ile basılmış ABS numunesine ait üç nokta eğme test grafiği.



Şekil 5.6 : FDM yazıcı ile basılmış PC/ABS numunesine ait üç nokta eğme test grafiği.

Tez çalışmasında 5'er adet ABS ve PC/ABS düz plaka numunelere uygulanan üç nokta eğme testi sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 5.3'de verilmektedir.

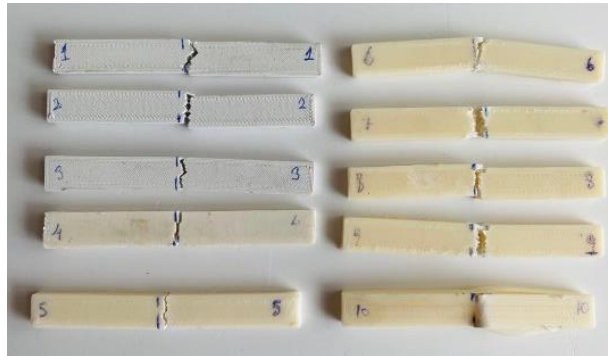
Çizelge 5.3 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin üç nokta eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Ort. Elastik Modülü (MPa)	Ort. Mak. Gerilme (MPa)	Ort. Mak. (%) Uzama
ABS	1530,39	43,50	4,94
PC/ABS	1466,60	45,48	5,44

Grafiklerden elde edilen bulgulara göre ABS ve PC/ABS kompozit malzemenin ABS malzemeye göre daha yüksek maksimum mukavemet gösterdiği ve üç nokta eğme dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Literatürde ABS malzemenin mekanik davranışları üzerinde yapılan araştırmaların incelenmesinde FDM yazıcı parametrelerinin malzemenin özelliklerine doğrudan etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [87-91]. Kamer ve arkadaşlarının [94] yapmış olduğu ABS ve PLA malzemeleri üzerinde yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi çalışmasında ABS malzemesi için yazdırma parametrelerinde dolgu deseninin mekanik özelliklere etkisi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

5.4 Darbe Test Sonuçları

ASTM D790-17 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS darbe test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan INSTRON-CAST 9050 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. ABS ve PC/ABS filamentlerinden üretilmiş düz plaka yapılara uygulanan darbe test numunelerine ait kırılma görselleri ABS malzeme için sırasıyla 1-5 ve PC/ABS malzeme için 6-10 olacak şekilde Şekil 5.6'da verilmektedir.



Şekil 5.7 : ABS ve PC/ABS malzemelere ait kırılma görseli.

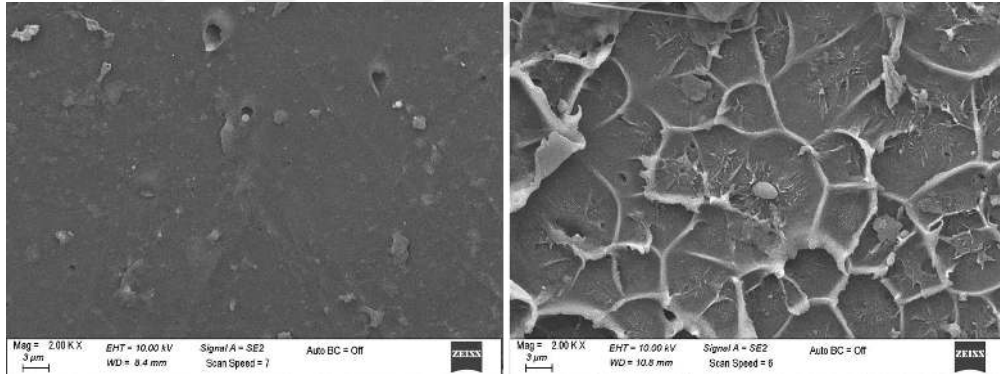
Darbe testi sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4’de verilmektedir.

Çizelge 5.4 : ABS ve PC/ABS düz plaka numunelerinin darbe testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Absorbe Edilen Enerji (%)	Re (Kj/m ²)	Enerji (J)
ABS	17,69	30,28	0,97
PC/ABS	32,70	55,9	1,8

ABS ve PC/ABS malzemelerinin absorbe ettiği enerji sırasıyla 1,8 J ve 0,97 J olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Numunelere ait kırılma yüzeyleri ve sonuçlar incelendiğinde PC/ABS malzemesinin darbe dayanımının ve absorbe edilen enerjinin saf ABS malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kırılma yüzeyleri Bursa Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Geminisem 360 SEM cihazında incelenmesiyle elde edilen mikroyapı görüntüleri sırasıyla ABS ve PC/ABS düz plaka yapılar için Şekil 5.8’de verilmektedir.



Şekil 5.8 : ABS ve PC/ABS malzemelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri.

Mikroyapılar incelendiğinde PC/ABS malzemenin ABS malzemeye göre daha sünek yapı sergilediği görülmektedir. Elde edilen darbe sonuçlarına göre absorbe edilen enerjinin artması mikroyapının göstermiş olduğu sünek davranış ile örtüşmektedir.

5.5 Sertlik ve Yoğunluk Test Sonuçları

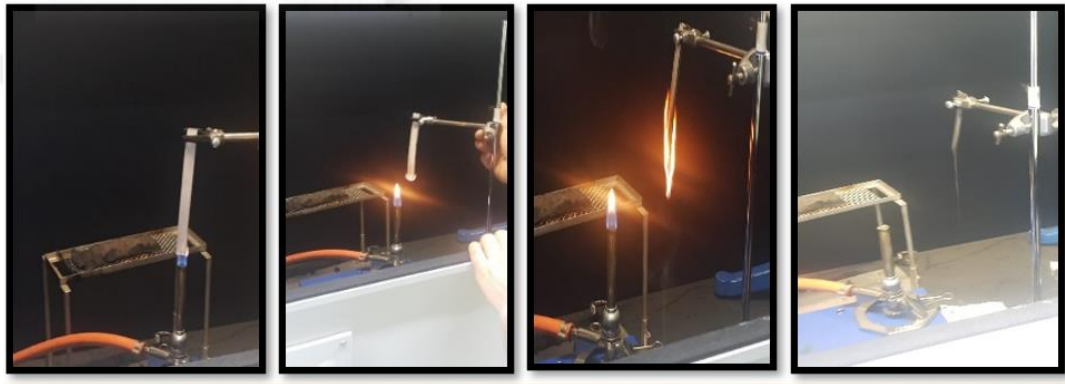
ABS ve PC/ABS numunelerine ait Shore D sertlik ve Arşimet yoğunluk değerleri Çizelge 5.5’de verilmektedir. ABS malzemeye PC ilavesi ile sertlik ve yoğunluk değerlerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.5 : ABS ve PC/ABS malzemelerine ait sertlik ve yoğunluk değerleri.

Numune Adı	Sertlik (Shore D)	Arşimet Yoğunluk (g/cm ³)
ABS	75	1,04
PC/ABS	81	1,27

5.6 Yanmazlık Test Sonuçları

ASTM UL-94 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS yanma test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Merlab Laboratuvarında bulunan FTT - UL94 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yanma test aşaması Şekil 5.9’da verilmektedir.



Şekil 5.9 : ABS ve PC/ABS malzemelerine uygulanan UL-94 yanma test aşaması [95].

UL-94 standardına göre yanma kriterleri Çizelge 5.6’da verilmektedir.

Çizelge 5.6 : UL-94 standardına göre yanma kriterleri.

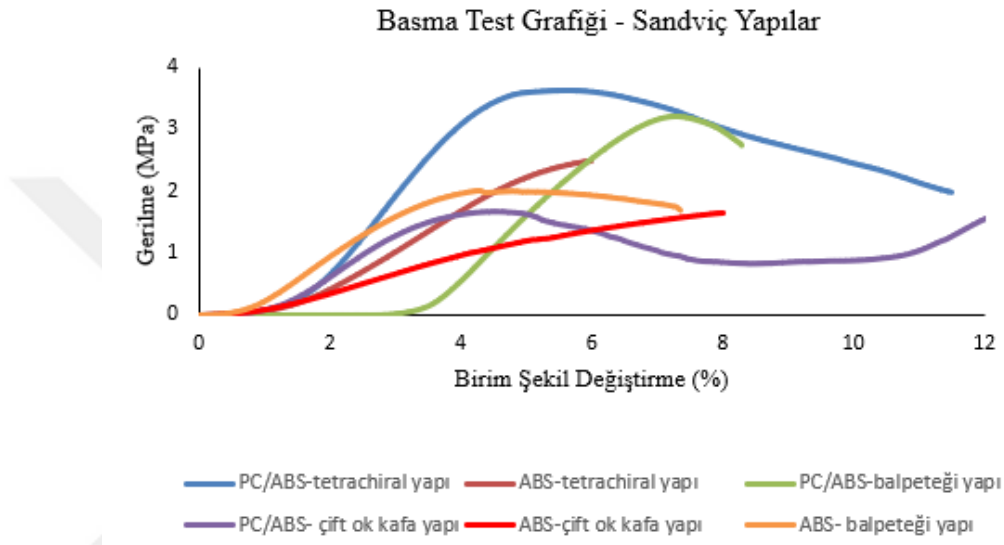
Kriter	V0	V1	V2
Her bir numunenin (t1 veya t2) saniye cinsinden yanma süresi	≤ 10	≤ 30	≤ 30
Saniye cinsinden 5 numune (t1 + t2) için toplam art alev süresi	≤ 50	≤ 250	≤ 250
İkinci alev uygulamasından sonra (t2 + t3) her bir numune için art alev artı parlaması süresi	≤ 30	≤ 60	≤ 60
Tutma kısıncasına kadar herhangi bir numunenin yanması veya parlaması	Hayır	Hayır	Hayır
Pamuk göstergesi alevli parçacık veya damlalar tarafından tutuştu	Hayır	Hayır	Hayır
Parçanın tamamen yanması	Hayır	Hayır	Hayır

Yanma test sonuçlarına göre ABS malzeme V2 sınıfında iken PC/ABS malzeme V0 sınıfında yer aldığı sonucuna ulaşılmıştır. PC ilavesi ile ABS kompozit malzemenin tutuşma süresi, alev alma süresi ve parlaması sürelerinde iyileşme sağlamaktadır.

Yapılan bu çalışma ile yanmazlık özelliği sağlayan PC malzemesiyle elde edilecek PC/ABS kompozitlerin ısı dayanımı ve yanmazlık istenilen ABS kullanım alanlarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5.7 Sandviç Yapıların Basma Testi Sonuçları

ASTM D7336/7336M-16 standardına uygun olarak üretilen ABS sandviç numunelerine ait basma test grafikleri Şekil 5.10'da verilmektedir.



Şekil 5.10 : Sandviç yapılara ait basma test grafiği.

Farklı geometrik yapılara sahip numunelere uygulanan basma testi sonucuna göre tetrachiral geometrik yapının hem ABS hem de PC/ABS kompozit sandviç numuneler için sırasıyla 3,63 MPa ve 2,48 MPa maksimum basma gerilmesine ulaştıkları görülmüştür. Aynı zamanda birim şekil değiştirme oranlarına bakıldığında çift ok kafa geometrik yapıya sahip numunenin maksimum basma kuvvetinin 1,76 MPa gelmesine karşılık uzama oranının 12,98 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca tetrachiral yapının şekil değiştirmesi dikkate alındığında plastik-elastik deformasyon göstererek yüksek enerji absorblama göstermektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Türkoğlu PLA malzemesi ile farklı çekirdek geometrilerinin sandviç kompozit yapılarının mekanik özelliklere etkisini çalışmış olup elde ettiği sonuçlara göre çift ok kafa ve tetrakiral çekirdek yapıları sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin çok daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır [41].

5.8 Sandviç Yapıların Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ASTM C393/C393M-16 standardına uygun olarak üretilen ABS ve PC/ABS üç nokta eğme test numuneleri Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan SHIMADZU-AG-XPLUS mekanik test cihazı ile oda sıcaklığında ve 5 mm/dk sabit hız ile gerçekleştirilmiştir. ABS ve PC/ABS kompozit sandviç numunelere uygulanan üç nokta eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 5.7’de verilmektedir.

Çizelge 5.7 : ABS ve PC/ABS kompozit sandviç numunelerinin üç nokta eğme testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Numune Adı	Maksimum Kuvvet (N)	Elastisite Modülü (MPa)	Eğrinin Altında Kalan Alan (Enerji Absorbe Etme Miktarı) (N.mm)
ABS-altıgen balpeteği yapı	3054,89	41,05	965,78
ABS-çift ok kafa yapı	1319,65	39,95	598,81
ABS-tetrakiral yapı	3106,23	41,35	1039,76
PC/ABS-altıgen balpeteği yapı	3298,34	53,65	1354,22
PC/ABS-çift ok kafa yapı	1593,45	51,95	697,94
PC/ABS-tetrakiral yapı	3312,70	54,05	2218,91

Farklı geometrik yapılara sahip numuneler üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Buna göre, tetrachiral geometrik yapının hem ABS hem de PC/ABS kompozit sandviç numuneler için sırasıyla 3106,23 N ve 3312,70 N’luk maksimum kuvvete ulaştıkları görülmüştür. ABS ve PC/ABS kompozit sandviç numunelerin elastik bölgedeki esneklik değerine göre enerji absorbe etme miktarları ise sırasıyla 1039,76 N.mm ve 2218,91 N.mm olarak hesaplanmıştır. ABS ve PC/ABS kompozit sandviç numunelerin eğilme mesafesinin sırasıyla 35 mm ve 43 mm dolaylarında maksimum kuvvete ulaştıkları belirlenmiştir.

Literatürde ABS malzemesi ile farklı çekirdek geometrilere sahip sandviç yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesine dair yapılan çalışmalarda öksetik çekirdek yapıya sahip yapıların geleneksel balpeteği sandviç yapılara kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [80-88].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FDM yazıcı ile üretilmiş saf ABS ve kompozit PC/ABS filamentlerinin FDM yazıcı ile üretilerek saf malzeme ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesinin amaçlandığı bu yüksek lisans tez çalışmasında kompozit malzemenin darbe dayanımının ve yanmazlık özelliğinin saf malzemeye oranla daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen mekanik test numunelerinin FDM yazıcı ile üretilen numunelere kıyasla daha yüksek mekanik özellik gösterdiği ancak yapılan diğer araştırmalar ve çalışma esnasında elde edilen bulgulara göre yazıcıya ait baskı parametrelerinin, hammadde seçiminin mekanik özelliklere doğrudan etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. ABS malzemenin yaygınca kullanıldığı uygulamalarda yanmazlık ve sünek davranış için PC/ABS malzemenin tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. ABS malzemesine PC ilavesiyle elde edilen kompozit yapı ile yanmazlık veya geç tutuşma arzu edilen uygulamalar için ideal malzeme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı zamanda farklı çekirdek geometrilerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesinin amaçlandığı bu çalışmada ABS malzemesinden üretilmiş altıgen, tetrachiral ve çift ok kafa çekirdek geometrisine sahip sandviç yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Geleneksel balpeteği çekirdek geometrisine sahip sandviç kompozitler ile karşılaştırıldığında tetrakiral çekirdek yapıya sahip sandviç kompozitlerin daha büyük darbe dayanımına ve daha çok enerji absorbe ettikleri sonucuna ulaşılmıştır. Üç nokta eğme testlerinde benzer sonuçlar elde edilen çekirdek geometrisiyle ilgili olarak deformasyona dayanım talep edilen uygulamalar için ideal yapı olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma, bir eklemeli imalat ürününün verimliliğini artırmak için kullanılacak geleneksel 3D baskı malzemelerinin yeteneklerini ve esnekliklerini göstermektedir. Sandviç kompozitlerin avantajları, düşük maliyetli malzemeler kullanarak çeşitli uygulamaların gereksinimlerini gerçekleştirmeye ve gerçekleştirmeye uygun olduğu belirlenmiştir. ABS ve PC/ABS dışında kalan yüksek

mekanik özelliklere sahip hammaddeler ile üretildiğinde de arzu edilen özelliklere sahip yapıların eldesi mümkündür. Yapılan tüm çalışmaların sonucunda yazıcı parametrelerinin, kullanılan hammaddenin, üretim yönteminin elde edilen yapıların mekanik özelliklere doğrudan etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] **Oğulcan E.** (2017). *3B Yazıcı İle Kompozit Parça Tasarımı ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] **Sivasubramanian P., Mayandi K., Arumugaprabu V., Rajini N., and Rajesh S.** (2022). History of Composites and Polymers. *Polymer-Based Composites Design, Manufacturing and Applications* (sf 1-21). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/352958176_History_of_Composites_and_Polymers.
- [3] **Velu R., Raspall F. and Singamneni S.** (2019). 3D Printing Technologies and Composite Materials for Structural Applications. *Green Composites for Automotive Applications* (sf 171-196). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021774000082>
- [4] **Saba N., Jawaid M. and Asim M.** (2019). Nanocomposites with Nanofibers and Fillers from Renewable Resources. *Green Composites for Automotive Applications* (sf 145-170). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021774000082>
- [5] **Akbarzadeh A. H., Fu J. W., Chen Z. T., Qian L. F.** (2014). Dynamic Eigenstrain Behavior of Magnetoelastic Functionally Graded Cellular Cylinders. *Composite Structures* (Vol 116, sf 404-413). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822314002530#preview-section-abstract>
- [6] **DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Zhang W.** (2018) Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties. *Progress in Materials Science*. (Vol 92, sf 112–224). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642517301172>
- [7] **Jones R.M.** (1998) *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press. Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781498711067/mechanics-composite-materials-robert-jones>
- [8] **S. M. Sapuan.** (2017). Composite Materials. *Composite Materials Concurrent Engineering Approach*. (Sf 57-93). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/book/9780128025079/composite-materials#book-info>
- [9] **Clyne T. W., Hull D.** (2019). Fiber and Matrices. *An introduction to Composite Materials*. (sf 9-38). Retrieved from

<https://www.cambridge.org/core/books/an-introduction-to-composite-materials/E42355260EDA500515C567390271E995>

- [10] **Kaw, A. K.** (2006). Introduction to Composite Materials. *Mechanics of Composite Materials*. (2nd ed., sf 1-59). Retrieved from https://sarrami.iut.ac.ir/sites/sarrami.iut.ac.ir/files/files_course/01-mechanics_of_composite_materials_sbookfi.org_.pdf
- [11] **Morris P.J.** (2005). Polymer Pioneers. *A Popular History of the Science and Technology of Large Molecules* (Vol 78, No 2). Retrieved from <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/354421>
- [12] **Singh M. K., Verma N., Zafar S.** (2021). Conventional Processing of Polymer Matrix Composites. *Lightweight Polymer Composite Structures Design and Manufacturing Techniques*. (1st ed., sf 21-67). Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429244087-2/conventional-processing-polymer-matrix-composites-singh-verma-zafar>
- [13] **Li D. H.** (2017). Three-Dimensional Analysis of Transverse Crack Fiber Bridging in Laminated Composite Plates. *Composite Structures*. (Vol 164, sf 277-290). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316324795>
- [14] **Chawla K. K.** (2019). Repair and Recycling of Composites. *Composite Materials*. (4th ed., sf 517-528). Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-28983-6>
- [15] **Ruzuqi R.** (2020). Impact Strength Analysis of Polymer Composite Materials (PMC) Fiber Reinforced in the Fiberboat Application. *Material Science Research India* (Vol 17, No(2), sf 170-172). Retrieved from <http://www.materialsciencejournal.org/vol17no2/impact-strength-analysis-of-polymer-composite-materials-pcm-fiber-reinforced-in-the-fiberboat-application/>
- [16] **Chawla N., Chawla K. K.** (2006). Matrix Materials. *Metal Matrix Composites*. (sf 37-54). Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-9548-2>
- [17] **Miracle D. B., Majumdar B. S., Krishnamurthy S. and Waterbury M.** (1993). In Metal Matrix Composites. *Ninth International Conference on Composite Materials. A. Miravete, Ed., Woodhead Publishing Ltd.* (sf 610-650). Retrieved from https://books.google.com.tr/books/about/Proceedings_of_the_Ninth_International_C.html?id=p7x7zSsRD7kC&redir_esc=y
- [18] **Alçı M.** (2006). *Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların, Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [19] **Premkumar M. K., Hunt W. H., Sawtell R. R.** (1992). Aluminum Composite Materials for Multichip Modules. *Journal of Materials*, JOM 44, 24-28.

- [20] **Ha J.** (1991). Toughing Mechanisms in Weak Matrix Ceramic Composites. *Comprehensive Composite Materials* (sf 95-114). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/279616364_Toughening_Mechanisms_in_Long_Fiber_Ceramic_Matrix_Composites
- [21] **ClauB B.** (2008). Ceramic Matrix Composites. Krenkel W. (Ed) *Fiber Reinforced Ceramics and their Applications* (2nd, sf 1-20). Germany : Wiley.
- [22] **Wang Z., Donga S., Hea P., Gaoa L., Zhoua H., Yang J., Jiang D.** (2010). Fabrication of Carbon Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites with Improved Oxidation Resistance Using Boron as Active Filler. *Journal of the European Ceramic Society* (Vol 30, sf 787-792). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955221909004671>
- [23] **Glass D. E.** (2008). Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles, *15th AIAA Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, Dayton, USA.
- [24] **Reinhart T. J.** (1998). Overview of Composite Basic and Road Map. *Handbook of composites*. (sf 21-33). Chapman & Hall, London. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4615-6389-1>
- [25] **Peters S.T.** (2004). Composite Materials and Processes. *Harper, C.A. (Ed.), Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*. (4th ed., sf 229-320). New York: The McGraw-Hill.
- [26] **Ibarra R. M. (2014).** *Cabon Fiber Recovery Using Subcritical and Supercritical Fluids for Chemical Recycling of Thermoset Composite Materials*. (Thesis for Doctor Engineering). Autonomous University of Nuevo Leon, Spanish.
- [27] **Biron, M.** (2007). Thermoplastics and Thermoplastic Composites. Technical Information for Plastic Users. (1st ed., sf 229-430). Retrieved from Thermoplastics and Thermoplastic Composites - 1st Edition (elsevier.com)
- [28] **Barbero, E. J.** (2010). Fabric-reinforced Composites. *Introduction to Composite Materials Design*. (3rd ed., sf 508). Boca Raton: CRC press. Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781315296494/introduction-composite-materials-design-ever-barbero>
- [29] **Sharma S. D., Sowntharya L., Kamal K. Kar.** (2017). Polymer-Based Composite Structures: Processing and Applications. (Vol 1sf 1-36). *Composite Materials, Processing, Applications, Characterizations*. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-49514-8#about-this-book>
- [30] **Kısaşöz A. A. (2018).** *Alüminyum Matrisli Titanyumdiborür İnsitu Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [31] **Hesseler S., Stapleton S. E., Appel L., Schöler S., Manin B. (2021).** Modelling of Reinforcement Fibers and Textiles, *Advances in Modelling and Simulation in Textile Engineering* (sf 267-299). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128229774000108ss>
- [32] **Yaşar, İ. ve Arslan, F. (2000).** Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi. (sf 181-191). *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. Trabzon, Türkiye: Aralık 11.
- [33] **Söyler, A.U. (2008).** *Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] **William D., Callister Jr., Rethwisch G. (2007).** Composites. (10th ed., sf 564-595). *Materials Science and Engineering an Introduction*. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering:+An+Introduction,+10th+Edition-p-9781119405498>
- [35] **Url-1** <<https://www.elektrikde.com/kompozit-malzeme-nedir-kullanimi-ve-ornekleri/>>, erişim tarihi 18.11.2022.
- [36] **Efe M. O. (2019).** *Farklı Destek Mesafelerinde Polivinil Klorür (PVC) Çekirdek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Eğilme Davranışının Nümerik Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [37] **Demir E. (2017).** *Understanding the Mechananics of Nanoreinforced Polymer Foam Core Sandwich Structures with A Numerical and Experimental Analysis* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [38] **Akkuş H. (2016)** *Bal peteği yapıların mekanik davranışlarının nano parçacık takviyeli yapıştırıcı kullanılarak deneysel ve teorik olarak araştırılması* (Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [39] **Solmaz M. Y., Çelik E. (2018).** 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yükü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 30(1), 277-286.
- [40] **Carlsson L.A, Kardomateas G.A. (2011).** Solid Mechanics and Its Applications. (SMIA Vol 121, syf 1-17). *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-3225-7_1
- [41] **Türkoğlu İ. K. (2020).** *3Boyutlu Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Termoplastik Esaslı Ökzetik Çekirdek Geometrilili Sandviç Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Davranışının İncelenmesi* (Doktora Tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [42] **Karataş İ. (2020).** *Üç Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Balpeteği Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Araştırılması*

(Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [43] **Katzman, H. A., Castaneda, R. M., Lee, H. S.** (2008). Moisture diffusion in composite sandwich structures.(Vol 39(5), sf 887-892). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X08000079>
- [44] **Odacı İ. K.** (2011). *The Projectile Impact Responses of the Composite Faced Aluminum Foam and Corrugated Aluminum Sandwich Structures : a Comparative Study* (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [45] **Grünewald, J., Parlevliet, P., Altstädt, V.** (2015). Manufacturing of Thermoplastic Composite Sandwich Structures: A review of literature. (Vol 30(4), sf 437-464). *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. Retrieved from https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0892705715604681?casa_token=y_BvYhdQ2kkAAAAA%3ABI_HS-VaFDNlAhTcOVSS8xMsLxePWBBMW3EOAloA2-U7SaRRO2stFmttVBQr2sPJ4ceMmhlhX2t_quQ
- [46] **Gibson, L. J., Ashby, M. F.** (1999). Material Properties. (2nd ed., sf 52-92). *Cellular Solids Structure and Properties*. New York: Cambridge University Press.
- [47] **Galos, J., Sutcliffe, M., and Newaz, G.** (2016). Design, Fabrication and Testing of Sandwich Panel Decking for Use in Road Freight Trailers (Vol 20 (6), sf 1-24). *Journal of Sandwich Structures & Materials*. Retrieved from <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1099636216680153>
- [48] **Wadley H. N. G., Fleck, N. A., Evans A. G.** (2003). Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures (Vol 63 (16), sf 2331-2343). *Composites Science and Technology*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353803002665>
- [49] **Kooistra G. W., Deshpande V., Wadley H. N. G.** (2007). Hierarchical Corrugated Core Sandwich Panel Concepts (Vol 74 (2), sf 259-268). *Journal of Applied Mechanics*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/252938148_Hierarchical_Corrugated_Core_Sandwich_Panel_Concepts
- [50] **Moonkhamklang, P.** (2009). *Titanium-Silicon Carbide Composite Lattice Structures* (PhD Thesis). University of Virginia, Department of Materials Science and Engineering, Virginia, USA.
- [51] **Challapalli, A.** (2015). *Loading Mode Dependent Effective Properties of Octet-truss Lattice Dtructures Ising 3D-printing* (MSC Thesis). University of North Texas, Department of Mechanical and Energy Engineering, Texas, USA.

- [52] **Alderson A, Alderson KL.** (2007). Auxetic Materials. (Vol 221(G4) sf 565–75). P I Mech Eng G-J Aer.
- [53] **Howell B, Prendergast P, Hansen L.** (1994). Examination of Acoustic Behavior of Negative Poisson's Ratio Materials (Vol 43 (2), sf 141-148). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0003682X94900574>
- [54] **Uzun M.** (2017). Negative Poisson Ratio (Auxetic) Materials and Their Applications (Sayı 77, sf 14-18). *The Journal of Textiles and Engineers*. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/137284>
- [55] **Gibson L. J., Ashby M. F., Schajer G. S. ve Robertson C. I.** (1982). The Mechanics of Two Dimensional Cellular Materials /Vol 7 (1782), sf 25-42). London: Proceeding of the Royal Society.
- [56] **Christensen J., Kadic M., Kraft O., Wegener M.** (2015). Vibrant Times for Mechanical Metamaterials (Vol 5 (3), sf 453-462). *MRS Communications*. Retrieved from <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-communications/article/vibrant-times-for-mechanical-metamaterials/B5493991838BDE3161B03C42C2B2EA75>
- [57] **Lee, J. H., Singer J. P., Thomas E. L.** (2012). Micro-Nanostructured Mechanical Metamaterials (Vol 24 (36) sf 4782-4810). *Advanced Materials*. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201201644>
- [58] **Ashjari M., Saadatm S., Hashemi S.M., Rasoulia A.** (2017). Auxetic Materials Materials with Negative Poisson's Ratio (Vol 1 (2), sf 62-64). *Material Science & Engineering International Journal*. Retrieved from <http://medcraveonline.com/MSEIJ/MSEIJ-01-00011.pdf>
- [59] **Alderson et al.** (2010). Elastic Constants of 3-, 4- and 6-Connected Chiral and Antichiral Honeycombs Subject to Uniaxial in-Plane Loading (Vol 70 (7), pp 1042-1048). *Composite Science and Technology*. Retrieved from https://shura.shu.ac.uk/7200/1/In-plane_chirals_revised_clean.pdf
- [60] **Bacigalupo A., & Gambarotta L.** (2014). Homogenization of Periodic Hexa- and Tetrachiral Cellular Solids (Vol 116, pp 461-476). *Composite Structures*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822314002438>
- [61] **Cottleer M.** (2014). 3D Opportunity for Production: Additive Manufacturing Makes its (Business) Case. (15 pp 146-161). *Deloitte Review*. Retrieved from <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/tr/Documents/manufacturing/3d-opportunity-for-production.pdf>
- [62] **Aguilera E.** (2016). *Creating Multi-Functional G-Code for Multi-Process Additive Manufacturing* (PhD Thesis). University of Texas, Department of Electrical Engineering, Texas, USA.

- [63] **Jimenez M., Romero L., Dominguez I., Espinosa M., Dominguez M., (2019),** Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects (pp 23-34). *Complexity in Press*.
- [64] **Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. and Hui D. (2018)** Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges (Vol 143 pp 172-196). *Composites Part B: Engineering*.
- [65] **Özkan D. Ç., (2019),** Hızlı Prototipleme Teknolojisinin Gelişimi, Çeşitleri ve İmalat Sektöründe Sağladığı Avantajlar (Cilt 3, sayfa 34-41)., MMO, *Mühendis ve Makine Güncel*. Retrieved from https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/012_imalat_yazara.pdf
- [66] **Çelik İ., Karakoç F., Çakır M. ve Duysak A. (2013).** Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulamaları (Cilt 31, sf 53-70). *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*. Retrieved from https://scholar.google.com.tr/citations?view_op=view_citation&hl=tr&user=dNMpoesAAAAJ&citation_for_view=dNMpoesAAAAJ:KlAtU1dfN6UC
- [67] **Fina F., Goyanes A., Gaisford S., Abdul W. Basit. (2017),** Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing of Medicines. *International Journal of Pharmaceutics* (Vol 529(1-2), pp 285-293).
- [68] **Vidakis N., Petousis M., Vaxevanidis N., Kechagias J. (2020),** Surface Roughness Investigation of Poly-Jet 3D Printing *Mathematics* (Vol 8 (10), pp 1-14). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/344627589_Surface_Roughness_Investigation_of_Poly-Jet_3D_Printing
- [69] **Rabkin E., Novick-Cohen A., Klinger L. ve Frage N. (2018),** Heat Transfer and Phase Formation through EBM 3D-Printing of Ti-6Al-4V *Cylindrical Parts, Defect and Diffusion Forum*, 383, 190-195.
- [70] **Url-2** <<https://newsroom.porsche.com/en/2020/technology/porsche-cooperation-mahle-trumpf-pistons-3d-printer-power-efficiency-911-gt2-rs-21462.html>>, erişim tarihi 01.09.2022.
- [71] **Url-3** <<https://uyep.anadolu.edu.tr/makale/72-bilim-dunyasinda-bir-ilk-3-boyutlu-yazicida-kalp-uretildi>>, erişim tarihi 01.09.2022.
- [72] **Url-4** < <https://3d3teknoloji.com/blog/dis-hekimliginde-dental-3d-yazici-kullanimi/>>, erişim tarihi 01.09.2022.
- [73] **Url-5** < https://www.fiyatimbu.com/blog/sanat-ve-mimaride-3d-printer-uygulamalari_211>, erişim tarihi 01.09.2022
- [74] **Cahang Q., Remennikov A., Pei L. Z., Yang S., Yu Z. H., Ngo T. D. (2017),** Impact and Close-in Blast Response of Auxetic Honeycomb-Cored Sandwich Panels: Experimental Tests and Numerical Simulations. *Composite structures*. (Vol 180, pp 161-178).
- [75] **Lakes R. (1987).** Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*. (Vol 235, pp 1038-1041).

- [76] **Ingrole A., Hao A., Liang R.** (2017). Design and Modeling of Auxetic and Hybrid Honeycomb Structures for in-Plane Property Enhancement. *Materials & Design*. (Vol 117, pp 72–83).
- [77] **Mohsenizadeh M., Gasbarri F., Munther M., Beheshti A., Davami K.** (2018). Additively-Manufactured Lightweight Metamaterials for Energy Absorption. *Materials & Design*. (Vol 139, pp 521–530).
- [78] **Liao G., Li Z., Cheng Y., Xu D., Zhu D., Jiang S., Zhu, Y.** (2018). Properties of Oriented Carbon Fiber/Polyamide 12 Composite Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*. (Vol 139, pp 283–292).
- [79] **Chen Y., Li T., Jia Z., Scarpa F., Yao C.-W., Wang L.** (2018). 3D printed Hierarchical Honeycombs with Shape Integrity Under Large Compressive Deformations. *Materials & Design*. (Vol 137, pp 226–234).
- [80] **Solmaz, M. Y., Çelik, E.** (2018). 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. (30(1), 277-286).
- [81] **Li T., & Wang L.** (2017). Bending Behavior of Sandwich Composite Structures with Tunable 3D-Printed Core Materials. *Composite Structures*. (Vol 175, pp 46–57).
- [82] **Hou S., Li T., Jia Z., Wang L.** (2018). Mechanical Properties of Sandwich Composites with 3d-Printed Auxetic and Non-Auxetic Lattice Cores Under Low Velocity Impact. *Materials & Design*. (Vol 160, pp 1305–1321).
- [83] **Alomarah A., Masood S. H., Sbarski I., Faisal B., Gao Z., Ruan D.** (2019). Compressive Properties of 3D Printed Auxetic Structures: Experimental and Numerical Studies. *Virtual and Physical Prototyping*. (Vol 15, pp 1-21).
- [84] **Quan C., Han B., Hou Z., Zhang Q., Tian X., Lu T. J.** (2020). 3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Auxetic Honeycomb Structures. *Composites Part B* (187, 107858).
- [85] **Taghizadeh S. A., Naghdinasab M.** (2021) Investigation of Novel Multi-Layer Sandwich Panels Under Quasi-Static Indentation Loading Using Experimental and Numerical Analyses. *Thin-Walled Structures*. (Vol 160, 107326).
- [86] **Günaydın K., Eren Z., Kazancı Z., Scarpa F., Grande A., M., Türkmen S.** (2019). In-Plane Compression Behavior of Antitetrachiral and Re-Entrant Lattices. *Smart Materials and Structures*. (Vol 28(115028), pp 1-14).
- [87] **Hu L.L, Luo Z.R., Zhang Z.Y., Lian M.K., Huang L.S** (2019) Mechanical Property of Re-Entrant Anti-Trichiral Honeycombs Under Large Deformation. *Composite Part B: Engineering*. (Vol 163, pp 107-120).

- [88] **Qi C., Jiang F., Yang S., Remennikov A. (2021).** Multi-Scale Characterization of Novel Re-Entrant Circular Auxetic Honeycombs Under Quasi-Static Crushing. *Thin-Walled Structures*. (Vol 169, 108314).
- [89] **Cava K., Aslan M., Alver Ü., Gedikli H. (2019).** Compression Behaviour of Auxetic and Honeycomb Core Materials Manufactured by FDM Printer (sf 964-970). *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*. Retrieved from http://indexive.com/uploads/papers/pap_indexive15943020742147483647.pdf
- [90] **Url-6** < <https://i-maker.jp/i/basf-ultrafuse-abs-fusion> >
- [91] **Panes A. R., Claver J., Camacho A. M. (2018).** The Influence of Manufacturing Parametres on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials* 2018, 11, 1333. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/8/1333>
- [92] **Dawoud M., Taha I., Ebeid S. J. (2016).** Mechanical Behavior of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques. *Journal of Manufacturing Processes* (sf 39-45). Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612515001395?casa_token=MJRSFRHsmiYAAAAA:QnljiLzQTAXjD826efS8_IMsPzEtHcqR8SLup3eu-qmLCJVHiMPdV5EsKX94S7r_6oV-MHsk6Q
- [93] **Özsoy K., Erçetin A., Ç. Z. A. (2021).** Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (Sayı 27, sf 802-809). Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1927057>
- [94] **Kamer M. S., Doğan O., Temiz Ş., Yaykaşlı H. (2021).** 3 Boyutlu Yazıcı İle Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* (36(3)) (835-846), Eylül 2021. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2014320>
- [95] **Öztürk A., Sarıbal F., Duman Ş., Akkoyun M., Şen İ., Ovalı D. (2020).** Polyamide 12/Antimony Trioxide/Sepiolite or Boron Composites: Mechanical Properties and Flame Retardancy. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* (35(4) sf 1083-1090).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Seda DENİZ KARA

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği