
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ÜÇ BOYUTLU FARKLI POLİMER KAFES YAPILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet Yavuz KARABULUT

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2026

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet YAVUZ KARABULUT

22/01/2026

ÜÇ BOYUTLU FARKLI POLİMER KAFES YAPILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mehmet Yavuz KARABULUT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Bu çalışmada üç boyutlu (3B) farklı polimer kafes yapılı çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla üç boyutlu yazıcı ile termoplastik poliüretan (TPU) ve Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) filamentler kullanılarak gyroid ve fluorite kafes yapı formunda numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca kafes yapı formunda üretilen numunelerin kıyaslanabilmesi için kontrol (K), sentetik lifli (SL) ve çelik lifli (ÇL) numuneler üretilmiştir. 70x70x70 mm ve 70x70x270 mm boyutlarında toplamda 21 adet prizma ve 42 adet küp numunesi test edilmiştir. Küp numuneler üzerinde basınç dayanımı ve darbe dayanımı deneyleri yapılmış olup prizmatik numuneler üzerinde ise eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile elde edilen sonuçlara göre; sentetik lif katkılı numunelerin basınç dayanımının en yüksek olduğu, PETG gyroid kafes yapılı numunelerin ise en düşük basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Darbe dayanımı deneylerinde TPU fluorite kafes takviyeli yapının kullanıldığı numunelerin en yüksek darbe dayanımı değerine ulaştığı görülmüştür. Eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre, TPU filament kullanılan gyroid kafesli numunelerde, kontrol ve lif katkılı numunelere kıyasla eğilme dayanımında bir miktar azalma görülmüştür. Buna karşın, kafes yapının sağladığı artan deformasyon kapasitesi sayesinde numunelerin tokluk değerlerinde kontrol ve lifli numunelere göre önemli bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu çalışma, üç boyutlu yazıcı ile tasarlanan ve üretilen kafes yapıların katmanlı imalat teknolojilerinin inşaat sektöründe yenilikçi bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Araştırmanın sonuçları, özellikle yüksek darbe dayanımı ve tokluk gerektiren altyapı ve özel yapı projelerinde yeni nesil kompozit sistemlerin geliştirilmesine öncülük edebilecek niteliktedir.

Bilim Kodu : 91136

Anahtar Kelimeler : Gyroid kafes yapılar, fluorite kafes yapılar, kafes yapılar, üç boyutlu yazıcılar, mekanik özellikler

Sayfa Adedi : 110

Danışman : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF CEMENT-BASED COMPOSITES WITH DIFFERENT THREE DIMENSIONAL POLYMER LATTICE STRUCTURES

(Doctoral Thesis)

Mehmet Yavuz KARABULUT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

This study investigates the engineering properties of concrete based composites incorporating three-dimensional (3D) polymer lattice structures. For this purpose, specimens with Gyroid and Fluorite lattice geometries were fabricated using thermoplastic polyurethane (TPU) and polyethylene terephthalate glycol (PETG) filaments via additive manufacturing. In addition, control (C) synthetic fibre reinforced (SyFR), and steel-fibre reinforced (StFR) specimens were produced to enable comparison with the lattice-structured specimens. A total 21 prism specimens and 42 cube specimens with dimensions of 70x70x270 mm and 70x70x70 mm were subjected to experimental testing. Compressive strength and impact resistance test were conducted on the cubic specimens, while flexural strength test was performed on the prismatic specimens. According to the results obtained from the study, the specimens containing synthetic fibre exhibited the highest compressive strength, whereas the PETG Gyroid lattice structured specimens demonstrated the lowest compressive strength values. In impact resistance tests, specimens reinforced with the TPU Fluorite lattice structures achieved the highest impact resistance values. Based on the flexural strength results, a slight reduction in flexural strength was observed in Gyroid lattice specimens produced using TPU filament compared to the control and fibre-reinforced specimens. However, owing to the enhanced deformation capacity provided by the lattice structures, a significant improvement in toughness was observed relative to both control and fibre reinforced specimens. This study demonstrates that lattice structures designed and fabricated using 3D printing technology can be effectively integrated into concrete based composites, offering innovative applications for additive manufacturing in the construction industry. The outcomes of this research suggest that such lattice reinforced composite systems have strong potential for use in infrastructure and specialized structural applications requiring high impact resistance and enhanced toughness.

Acience Code	: 91136
Key Words	: Gyroid structures, fluorite structures, lattice structures, 3D printing, mechanical properties
Page Number	: 110
Supervisor	: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

TEŞEKKÜR

Gazi Üniversitesi'nde doktora eğitimim süresince, değerli fikirlerini, engin bilgilerini, yardımlarını esirgemeyen, kıymetli zamanını benden hiç sakınmayan, değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmam boyunca bana her aşamada rehberlik eden, değerli görüşlerini, desteklerini ve katkılarını hiçbir zaman eksik etmeyen, tezimin izlenmesi ve değerlendirilmesi sürecinde sağladıkları yardım ve katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK ve Sayın Prof. Dr. İlhami DEMİR'e gönülden teşekkür ederim.

Deneylerin yapılması sırasında, test düzeneklerinin hazırlanması, makinelerin kullanılması, makinelerin bakımı ve bazı test düzeneklerinin yeniden kurulması ve makine temini süreçlerinde bana her zaman rehberlik eden, desteklerini ve katkılarını eksik etmeyen yardım ve katkılarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ATEŞ'e gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, tüm bu süreç boyunca moral ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, bana her zaman desteğini esirgemeyen değerli eşim Begüm Yelda GÜR KARABULUT'a ve sevgili kızım Begüm Mine Pera'ya teşekkür ederim. Benim bugünlere gelmeme vesile olan aileme teşekkür ederim.

Başta Furkan Tuğrul olmak üzere bana yardım eden tüm öğrencilerime teşekkür ederim.

FDK-2022-8071 proje kodu ile çalışmayı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ne teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

2.1. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi 3

2.1.1. Bağlayıcı püskürtme tekniği 3

2.1.2. Yönlendirilmiş enerji birikimi 4

2.1.3. Malzeme püskürtme 4

2.1.4. Toz yatak füzyonu 5

2.1.5. Levha laminasyonu 5

2.1.6. Vat fotopolimerizasyonu 6

2.1.7. Malzeme ekstrüzyonu 7

2.2. Filament türleri 10

2.2.1. Polimerler 10

2.2.2. Metaller 13

2.2.3. Seramikler 15

2.2.4. Kompozitler 17

2.2.5. Özel malzemeler 19

Sayfa

2.3. Kafes Türleri 20
2.3.1. Kafes yapıların sınıflandırılması 21
2.3.2. Kafes yapıların boyutlarına göre sınıflandırılması 25
2.3.3. Kafes yapı parametreleri ve mekanik özellikleri 32
2.3.4. Kafes yapıların enerji soğurumu 38
2.4. Çimento Esaslı Harç 39
2.4.1. Dayanım sınıfı ve mekanik özellikler 39
2.4.2. Çalışılabilirlik ve akışkanlık 40
2.4.3. Lif takviyesi ile kombinasyon 40
2.4.4. Agrega boyutu ve granülometri 40
2.4.5. Kürleme koşulları ve dayanıklılık 40
2.5. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar 41
2.5.1. Doğadaki gyroid yapılar ve biyomimetik yaklaşımlar ile ilgili çalışmalar 41
2.5.2. Polimer tabanlı gyroid yapılar ve beton takviyesi ile ilgili çalışmalar 44
2.5.3. Metal tabanlı gyroid yapılar ve biyomedikal uygulamalar ile ilgili çalışmalar 54
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 59
3.1. Kullanılan Malzemeler 59
3.1.1. Çimento 59
3.1.2. Mineral katkılar 59
3.1.3. Agrega 60
3.1.4. Akışkanlaştırıcı 60
3.1.5. Su 61
3.1.6. Lifler 61
3.1.7. Filament 62
3.2. Yöntem 62

Sayfa

3.2.1. Kafes yapıların modellenmesi 63
3.2.2. Kafes yapıların üretilmesi 64
3.2.3. Karışımların hazırlanması ve oranları 66
3.2.4. Numunelerin üretimi 66
3.2.5. Basınç dayanımı deneyi 67
3.2.6. Eğilme dayanımı deneyi 69
3.2.7. Darbe dayanımı deneyi 70
3.2.8. İçyapı görüntüleri 71
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 73
4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları 73
4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları 80
4.3. Darbe Dayanımı Deney Sonuçları 91
4.4. İçyapı Görüntüleri 95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 99
KAYNAKLAR 101
ÖZGEÇMİŞ 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. 3B baskı yöntemleri karşılaştırma tablosu 9

Çizelge 2.2. Filament türleri 13

Çizelge 2.3. Gyroid ve kafes yapılarda kullanılacak harç için malzeme seçim kriterleri 41

Çizelge 3.1. Çimento ve mineral katkıların kimyasal analizi 60

Çizelge 3.2. Akışkanlaştırıcı malzemenin özellikleri 60

Çizelge 3.3. Çelik lif ve Sentetik lif in genel özellikleri 61

Çizelge 3.4. TPU, PETG filamentlerinin teknik özellikleri 62

Çizelge 3.5. PETG ve TPU filamentlerin karşılaştırılması 62

Çizelge 3.6. Kafes yapıların genel özellikleri 65

Çizelge 3.7. 1 m^3 Çimento esaslı harcın karışım miktarları 66

Çizelge 4.1. Tpu filament kullanılan kafes modellerinin karşılaştırması 76

Çizelge 4.2. PETG filament kullanılan kafes modellerinin karşılaştırması 77

Çizelge 4.3. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının karşılaştırması 89

Çizelge 4.4. Numunelerin tokluk ve yüzdesel değişimi 90

Çizelge 4.5. Darbe testi sonuçları tablosu 94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. 2B ve 3B birim kafes hücre çeşitleri 21

Şekil 2.2. İki boyutlu örnek kafes yapılar 21

Şekil 2.3. Hücresel yapıların sınıflandırılması 23

Şekil 2.4. Üç boyutlu kiriş kafes yapılar 25

Şekil 2.5. ÜPMY kafes yapılar 26

Şekil 2.6. Üç boyutlu plaka yapılar 27

Şekil 2.7. İki boyutlu ökzetik yapılara örnek 28

Şekil 2.8. Gradyan kafes yapı 29

Şekil 2.9. İki boyutlu hiyerarşik kafes yapı örneği 31

Şekil 2.10. Hibrit birim hücre 32

Şekil 2.11. Farklı birim hücre dizilimine örnek hibrit kafes yapılar 32

Şekil 2.12. Eğilme baskın yapı örneği ve gerinme baskın yapı örneği 34

Şekil 2.13. (a) Eğilme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi
(b) Gerinme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi 36

Şekil 2.14. Eğilme ve gerinme baskın yapı karakteristik hasar ilerlemesi 37

Şekil 2.15. 5x5x5 konfigürasyonunda gövde merkezli kübik kafes yapı 37

Şekil 3.1. Kafes takviyeli beton küp ve kiriş modelleri 65

Şekil 3.2. Darbe deneyi test cihazı 71

Şekil 4.1. Kontrol numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 73

Şekil 4.2. Çelik lifli numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 74

Şekil 4.3. Sentetik lifli numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 74

Şekil 4.4. TPU Fluorite numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 75

Şekil 4.5. TPU Gyroid numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 75

Şekil 4.6. PETG Fluorite numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 76

Şekil 4.7. PETG gyroid numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği 76

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.8. Numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması 78

Şekil 4.9. Kontrol numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği..... 81

Şekil 4.10. Çelik lifli numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği..... 82

Şekil 4.11. Sentetik lifli numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği 83

Şekil 4.12. PETG Gyroid numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği... 84

Şekil 4.13. PETG Fluorite numunelerin ortalama eğilme dayanımı-deplasman grafiği... 85

Şekil 4.14. TPU Fluorite numuneleri ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği..... 86

Şekil 4.15. TPU Gyroid numunelerinin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği .. 87

Şekil 4.16. Eğilme dayanımı- deplasman ilişkileri karşılaştırma grafiği 88

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. (a) Çelik lif (b) Sentetik lif 61

Resim 3.2. Gyroid ve fluorite kafes numunelerin kalıplara yerleştirilmesi 67

Resim 3.3. Basınç dayanım deney düzeneği..... 68

Resim 3.4. Eğilme deneyi test cihazı 69

Resim 4.1. Harç numunelerin kırılma sonrası görüntüleri 79

Resim 4.2. Darbe deneyine sonuçlarınaait görseller..... 91

Resim 4.3. PETG gyroid, PETG fluorite darbe deneyine ait görseller..... 92

Resim 4.4. Kontrol ve TPU Gyroid numunesinin kesimden sonraki yüzey görüntüsü.. 95

Resim 4.5. TPU Fluorite numunenin kesimden sonraki farklı yüzey görüntüleri 96

Resim 4.6. Kontrol ve PETG Gyroid numunenin kesimden sonraki yüzey görüntüsü.... 97

Resim 4.7. PETG Fluorite numunenin kesimden sonraki farklı yüzey görüntüleri..... 98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
cal	Kalori
g	Gram
GPa	Giga Pascal (Elastik Modül)
J	Joule
KN	Kilo Newton (Kuvvet Birimi)
lvdt	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler
MPa	Megapascal
Ncr	Çatlak Sayısı
Nf	Hasar/Göçme Sayısı
sn	Saniye

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
DWI	Serbest Ağırlık Darbe Deneyi
FRC	Fiber Lif Takviyeli-Donatılı Beton
FRP	Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Polimer
NA	Normal Agrega
NC	Normal Beton
PVA	Polivinil Alkol (Lif türü)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

İnsanlığın en büyük ihtiyacı olan barınma, korunma, ulaştırma ve altyapı inşasında farklı ihtiyaçlar bulunmakta ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda betondan istenilen özellikler değişmektedir. İnşaat sektöründeki yapıların, fonksiyonunu ve beklentilerini karşılamak üzere birçok farklı özelliklere sahip reaktif beton, vakumlu, lifli, köpük, ultra yüksek performanslı, sifcon vb. betonlar üretilmektedir. Son yıllarda beton kimyasal katkı maddeleri ve lif özeliklerinden dolayı araştırmalarda yüksek performanslı betonlar üzerinde durulmaktadır. Yüksek dayanım sadece bir özelliğinin en yüksek olması iken ultra yüksek performanslı beton ise tüm dayanımlarının en üst düzeyde olması halidir. Bunun için çok düşük su/çimento oranı, seçilen çimento sınıfı, agrega cinsi ve gradasyonu yüksek dayanım hedefi için gerekli olan kriterlerdir. Beton için önemli olan özelliklerinden bir diğeri ise dayanım kazanmaya devam etmesinin sağlanmasıdır. Ultra yüksek performanslı betonun kullanımında gevrekliğin yüksek oranda arttığı gözlenmiştir. Süneklilik hedefinden uzaklaşılması betonun gevrek olması ile sonuçlanmıştır. Gevrekliği azaltmak amacı ile donatı kullanılması yaygın bir tercihtir. Betonarme olarak tasarladığımız tüm yapılarda bu amaç gözetilmektedir. Betonun esnekliğinin sağlanması ve gelen kuvvet etkisi ile şekil değiştirmesi ancak içerisindeki donatı oranına bağlıdır. Donatı oranı az olursa ani kırılma gözlenir. Donatı oranı, kesitin belirli bir oranında sabit tutulması neticesinde beton çatladıktan sonra donatının uzaması sağlanır. Deprem gibi değişken ve dinamik yükler yapıyı etkilediğinde şekil değişimi donatı oranına bağlı kalmakta ve en önemli değişken olmaktadır (Koç ve Emiroğlu, 2015).

Gevrekliği azaltmak için donatı yerine alternatif bir yol olarak lifler de kullanılabilir. Betonarme yapı elemanlarının kesit ve donatı oranlarına gerek kalmadan liflerin kullanılması sünekliliği arttırmada benzersiz bir katkı sağlar. Yapılan çalışmalarda liflerin tokluk, süneklik, çatlak dayanımı ve davranışını önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir (Karabulut, 2017).

Lifli betonlar için karışımın içerisine belirli oranlarda lif eklenmektedir. Beton karıştırılmaya devam edilerek lifli beton üretilmektedir. Lifler hem harç karıştırılırken hem de kalıba yerleştirilme sırasında üç boyutlu olarak beton içerisine rastgele dağılmaktadır. Liflerin harç içine rastgele dağılması bazı sorunlara neden olmaktadır. Liflerin hangi düzlemde, ne kadar sıklıkla dağıldığı bilinememekle birlikte bazı eşit olmayan heterojen karışımlar olabilmektedir. Lifli betonda liflerin dağılımına müdahale edilebileceği gibi kalıba

yerleştirilmesi sırasında betonun liflerinin yönlendirilmesi de söz konusudur. Bu yönelim sayesinde çekme numunelerinin ve basınç numunelerinin amaçlanan ya da hedeflenen dayanımlara ulaşması sağlanmaktadır (Öztürk, Sevim, Akgöl ve Karaaslan, 2016).

Kafes yapılar (lattice), çimento esaslı kompozitlerin hem taşıma kapasitesini hem de enerji soğurma kapasitesini arttırmaktadır. Kafes yapıların 3B yazıcı ile üretilmesi hem geometrik olarak hem de malzeme çeşitliliği açısından büyük fayda sağlamaktadır. En az malzeme ile en yüksek hacmi kaplayan ayrıca sağlamlık sunan kafes yapıların beton içerisinde kullanımı umut vericidir. Beton içerisinde kafes yapılar yük taşıma, çatlak ilerleyişi ve şekil değiştirme davranışı ve kompozit davranışı güçlendirmektedir (Ashby, 2006).

Bu çalışmanın amacı, çimento esaslı malzemelerin sünekliğini artırmak için üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiş polimer kafes yapılarla geliştirilmiş yeni bir kompozit sistemin performansını araştırmaktır. Bu bağlamda, Gyroid ve fluorite formunda tasarlanan kafes yapılar, termoplastik poliüretan (TPU) ve Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) filamentleri kullanılarak Eriterek Biriktirme Modelleme (EBM) yöntemiyle üretilmiş ve harç içerisine entegre edilerek test edilmiştir. Numunelerin mekanik davranışları, basınç dayanımı ve üç noktalı eğilme testleriyle değerlendirilmiş; farklı kafes konfigürasyonlarının ve polimer türlerinin betonun sünekliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmada betonun sünekliğini artırmak amacıyla üç boyutlu kafes yapılarını donatı olarak kullanan yeni bir kompozit sınıfı incelemektedir. Bu bağlamda, yüksek özgül rijitlik ve kırılma tokluğu ile bilinen oktet kafes geometrisi kullanılmaktadır. Oktet kafes yapılar, FDM (Fused Deposition Modeling) tipi 3B yazıcılar kullanılarak PETG ve TPU polimerlerinden prototiplenmiştir. Donatı malzemesi olarak polimer kullanılması, bu yapıların daha hafif, korozyona dayanıklı ve ısıl olarak yalıtkan olmasını sağlamaktadır.

Çalışmada önerilen 3B baskılı polimer kafes takviyeleri, betonun gerinimle sertleşme kabiliyeti kazanmasını sağlayarak daha güvenli ve dayanıklı yapı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem, katmanlı imalat teknolojilerinin (3B baskı) beton takviyesinde kullanımına yönelik özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Sonuçlar, özellikle yüksek dayanım ve süneklik gerektiren altyapı projeleri ve özel yapı uygulamalarında yeni nesil kompozit sistemlerin geliştirilmesine öncülük edebilecek potansiyele sahiptir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çalışmanın ana iskeletini oluşturan polimer kafes kiriş modelleri ve çok güncel bir teknoloji olan 3B nin kullanım alanları ile inşaat teknolojisindeki çalışmalar incelenmiştir. İlk olarak, 3B yazıcı teknolojilerinin gelişimi, temel sınıflandırmaları ele alınarak üretim sürecine dair çalışmalar ile 3B yazıcıda kullanılan filament türleri ve yapısal özellikleri açıklanmıştır. Farklı kafes geometrilerinin yapısal performansa etkisi incelenmiştir.

2.1. Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi hızlı prototipleme (rapid prototyping RP) veya katmanlı üretim (additive manufacturing AM) olarak isimlendirilebilir. İlk olarak Charles Hull tarafından 1986 yılında katmanlı üretim tanımı ve üç boyutlu yazıcı teknolojisi ortaya çıkmıştır. 3B görüntülerin bilgisayar modelinin oluşturulması genellikle cismin dilimlere bölünerek katmanlardan oluşan bir "stl" dosyası üretimi ile başlar. Bu dosya ile katmanlı halde makineden üretim gerçekleştirilmektedir (Wang, Jiang, Zhou, Gou ve Hui, 2017).

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi her geçen gün yeni bir yazılım metodu, yeni yazıcılar, yeni filamentler sunmaktadır. ASTM F2792-12'a hızla gelişen bu teknoloji üzerine yapılan çalışmaları, ISO/ASTM 52900 Teknoloji Sınıf Kodlarını da kullanarak; üretim tekniklerini ve teknoloji bağlamında yedi farklı şekilde gruplandırmıştır (ASTM, 2012). Bunlar yazıcı bağlayıcı püskürtme tekniği, yönlendirilmiş enerji birikimi, malzemeyi püskürtme, toz yatak füzyonu, levha laminasyonu, vat fotopolimerizasyonu ve malzeme ekstrüzyonudur. İnşaat sektöründe veya plastik endüstrisinde en yaygın olanı Fused Deposition Modelling (FDM) Malzeme ekstrüzyonudur. ISO/ASTM 52900' a göre üç boyutlu yazıcı teknoloji sınıflandırmaları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

2.1.1. Bağlayıcı püskürtme tekniği (Binder Jet)

Bağlayıcı püskürtme tekniği özel bir katmanlı üretim sürecidir. Bağlayıcı püskürtme mürekkepli yazıcı teknolojisine benzer bir çalışma prensibi kullanır. Toz yatağından alınan tozlar katmanların oluşması için sürekli olarak yayılır. Endüstriyel bir baskı kafası, ince bir toz tabakasına sıvı bir bağlayıcı püskürterek kâğıda baskı yapmaya benzer şekilde çalışır. Bağlayıcı, toz parçacıklarını birbirine bağlar ve parçalar katman katman üretilir. Bu teknoloji, metal, seramik ve kompozit gibi

malzemelerle çalışarak yüksek hassasiyetle karmaşık şekiller üretebilir. Diğer 3B baskı teknolojilerinden farklı olarak; destek yapıları gerektirmez, malzeme kullanımını azaltır, son işlem süresini kısaltır, tozun %99'u geri dönüştürülebilir, maliyet düşüktür, izotropik parçalar üretilebilir ve parçalar her yönde eşit mukavemete sahiptir. Polimerler, seramikler, metaller, kumlar, hibrit karışımlar gibi çeşitli tozlardan baskı alabilir. Platform üzerine alınan baskı aşağı yönlüdür. Platform yüksekliğinin ayarlanmasıyla daha büyük hacimli üretimler yapılabilir (Wu, Luo, Cuniberti, Xiao ve Gelinsky, 2011; Ze-Xian ve diğerleri, 2016).

2.1.2. Yönlendirilmiş enerji birikimi

Malzemenin tamiri veya takviyesi için kullanılan ileri düzey bir 3B eklemeli üretim teknolojisidir. Bu yöntem, genellikle bir lazer, elektron ışını veya plazma arkı gibi yüksek enerjili bir ısı kaynağı ile çalışır. Isı kaynağı, aynı anda eritilen metal tozu veya tel şeklindeki malzemeyi, doğrudan belirlenen bölgeye uygular. Böylece malzeme yüzeyinde katman katman bir yapı oluşturulur. Sistemde kullanılan baskı başlığı çok eksenli olarak hareket edebilir. Bu özellik, karmaşık yüzeylerde ve çeşitli açılarda üretim veya tamirat yapılmasına olanak tanır. Teknoloji, metal, seramik, polimer ve kompozit gibi çok çeşitli malzemelerle uyumludur. Lazer birikimi (Laser Cladding) ve LENS (Laser Engineered Net Shaping) gibi yöntemler bu teknoloji grubuna dâhildir. Yönlendirilmiş enerji birikimi, yalnızca yeni parça üretiminde değil, aynı zamanda hasar görmüş parçaların onarımında da kullanılır. Farklı zamanlarda üretilmiş parçaların birleştirilmesi, aşınan ya da kırılan parçaların yeniden işlevsel hale getirilmesi mümkündür. Bu yönüyle teknoloji, özellikle havacılık, savunma, otomotiv ve makine imalatı gibi sektörlerde büyük avantaj sağlar (Curodeau, Sachs ve Caldarise, 2000; Lang, 2019; Syed ve diğerleri, 2017; Uğur, Gharehpapagh, Yaman ve Dolen 2017; Ramachandraiah, 2021; Yi, Lee ve Cho, 2017).

2.1.3. Malzeme püskürtme

Ultraviyole (UV) ışığa duyarlı malzemelerin kullanıldığı baskı, fotopolimerizasyon esasına dayalı bir 3B baskı yöntemidir. Baskı sırasında başlık, sıvı damlacıkları gerekli katmanları üretmek üzere püskürterek dağıtır. Daha sonra UV ışın, damlaları sertleştirerek katman katman üretim sağlar. Katmanların görünürlüğü üç boyutlu yazıcıların üretim kalitesinin belirlenmesinde dikkate alınan bir parametredir. Katmanların birleşim şekli ve yüzey pürüzlülüğü, bu yöntemin baskı kalitesini belirleyen önemli parametrelerdendir. İnce katman yapısı sayesinde yüksek çözünürlükte ve detaylı üretim yapılabilir. Bu teknoloji, özellikle

hassas detayların ve düzgün yüzeylerin kritik olduğu uygulamalarda tercih edilir. Geleneksel FDM veya toz tabanlı sistemlere kıyasla, çok daha net kenarlar ve daha az katman izi sunar. Takı, dental kalıplar, prototipler ve mikro parça üretimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Detay ve hassasiyeti diğer yazıcı türlerinden farklıdır (ASTM, 2012; Muller ve Karevska, 2016; Syed ve diğerleri, 2017; Lang, 2019; Uğur ve diğerleri, 2017; Silbernagel, 2018; Stansbury ve Idacavage, 2016; Yee ve diğerleri, 2017; Ze-Xian, ve diğerleri, 2016).

2.1.4. Toz yatak füzyonu

Toz yataklı eritme teknolojileri, malzeme tozlarının yüksek enerjili bir ışınla eritilmesi veya kaynaştırılması esasına dayanan bir 3B baskı yöntemidir. Toz malzeme katman halinde yayılır, lazer enerjisi ile üretilen katmanlar üst üste birikerek modeli oluşturur. Bu süreçte genellikle lazer veya elektron ışını kullanılır. Polimerler, seramikler, metaller ve hibrit tozlar gibi birçok farklı malzeme bu yöntemle işlenebilir. Bu teknoloji grubu, başta Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Isı Sinterleme (SHS) ve Elektron Işını Eritme (EBM) olmak üzere üç ana yöntemi kapsar. SLS, 1980'lerden bu yana kullanılan köklü bir teknolojidir. Bu yöntemde, toz malzeme yüzeye ince katmanlar hâlinde serilir ve lazer ile seçilen bölgeler sinterlenerek katılaştırılır. Her katman üst üste birikerek üç boyutlu modeli oluşturur. Ancak FDM (Fused Deposition Modeling) gibi yöntemlere kıyasla süreç daha yavaştır. Bunun nedeni, tozun düzgün serilmesi, sıkıştırılması ve lazerin her katman için beklemesi gereken süredir. Üretilen parçalar, toz yatağı içerisinde oluştuğu için alt ve üst yüzeylerde farklı malzeme özellikleri ve pürüzlülükler gözlemlenebilir. *SHS*, termoplastik tozların ısıtılmış bir baskı kafası yardımıyla sinterlenmesini esas alır. Bu yöntem genellikle düşük maliyetli sistemlerde kullanılır ve polimer bazlı uygulamalara yöneliktir. *EBM* ise özellikle metal tozlarının eritilmesinde kullanılan ileri düzey bir yöntemdir. Bu yöntemde, elektron ışını yüksek vakum ortamında toz malzemeyi doğrudan eriterek katı hâle getirir. Bu teknoloji, yüksek sıcaklık ve dayanım gerektiren havacılık ve biyomedikal sektörlerinde öne çıkar (Tiwari, Pande, Agrawal ve Bobade, 2015; Ventola, 2014).

2.1.5. Levha laminasyonu

Levha laminasyonu, malzeme levhalarının üst üste yerleştirilip yapıştırılmasıyla katmanlı üretim yapan bir 3B baskı teknolojisidir. Bu yöntem, Lamine Nesne İmalatı (LOM) ve

Ultrasonik Katkı İmalatı (UAM) olmak üzere iki ana teknolojiyle temsil edilir. LOM teknolojisinde, kâğıt, plastik ya da kompozit gibi levha hâlindeki malzemeler, yazıcı sistemini rulo hâlinde besler. Malzeme, modelin şekline göre bir lazer veya sıcak silindir yardımıyla kesilir ve her katman bir öncekinin üzerine yapıştırılarak üç boyutlu model oluşturulur. Kullanılmayan atık malzeme, ayrı bir rulo sisteminde toplanarak düzenli şekilde uzaklaştırılır. Bu özellik, kalan malzemenin değerlendirilmesine olanak tanır. Ayrıca, farklı renkte malzeme levhalarının kullanılmasıyla renkli baskılar veya iç yapıda katman farklılığı sağlanabilir. UAM ise daha çok metal folyo veya levhaların ultrasonik titreşimler kullanılarak birleştirilmesine dayanır. Bu yöntemde, ısı yerine yüksek frekansta ses dalgaları kullanılarak katmanlar arasındaki atomlar kaynaştırılır. Bu sayede düşük sıcaklıkta metal birleştirmesi mümkün olur. UAM, özellikle alüminyum, bakır ve titanyum gibi metallerin hassas biçimde birleştirilmesi gereken uygulamalarda kullanılır. Levha laminasyonu, düşük maliyetli malzemelerle çalışabilmesi ve hızlı üretim imkânı sunması sayesinde prototipleme, mimari modelleme ve bazı endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir yöntemdir. Atık rulosunun sürekli alınması geri kalan malzemenin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Farklı renkte malzemelerde üretim yapılmasını katmanların farklı olmasının sağlaması açısından farklılık göstermektedir (Silbernagel, 2018; Vikayavenkataraman, Jerry ve Wen, 2017).

2.1.6. Vat fotopolimerizasyonu

Vat Fotopolimerizasyonu, ışık, UV ya da lazer yardımıyla sıvı hâlde bulunan foto-reaktif polimerlerin kontrollü şekilde katılaştırılması (kürlenmesi) esasına dayanan bir 3B baskı teknolojisi olup, bu süreç fotopolimerizasyon olarak adlandırılır. Teknoloji temel olarak, özel bir reçine tankında bulunan sıvının ışıkla sertleştirilmesiyle katman katman üretim yapılmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji grubu içinde en yaygın kullanılan iki yöntem; Stereolitografi (SLA) ve Dijital Işık İşleme (DLP)'dir. SLA yönteminde, lazer ışını reçine yüzeyine odaklanarak belirli bölgeleri kürler ve katılaştırır. DLP ise bir projektör aracılığıyla her katmanı tümüyle aydınlatarak sertleştirir. Bu yöntem, SLA'ya göre daha hızlı çalışabilir. Üretim kalitesini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Kullanılan boyalar, pigmentler veya reçineye katılan katkı maddeleri (örneğin toz malzemeleri), ışığın yayılma biçimini etkileyerek farklı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Ayrıca, ışığın dalga boyu, pozlama süresi, ışık şiddeti ve güç kaynağının tipi, baskı hassasiyetini ve yüzey kalitesini doğrudan etkileyen unsurlardır. Işık yayımının süresi ve şiddeti farklı ürünlerin oluşmasını sağlamaktadır. Aynı şekilde pozlamanın, dalga boyunun ve güç kaynağının farklı olması yazıcının farklı baskılar

almasını sağlamaktadır. Vat fotopolimerizasyon teknolojileri, yüksek hassasiyet, ince detay üretimi ve pürüzsüz yüzey kalitesi nedeniyle; diş hekimliği, takı tasarımı, prototipleme ve kalıp üretimi gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Low ve diğerleri, 2017; Reddy, 2016).

2.1.7. Malzeme ekstrüzyonu (FDM)

Fused Deposition Modelling (FDM), günümüzde en yaygın olarak kullanılan ve en çok tercih edilen eklemeli üretim teknolojilerinden biridir. 1990'lı yıllardan bu yana kullanılmakta olan bu yöntem, katmanlı üretim prensibine dayanmaktadır. Sistemde, termoplastik malzeme bir makaradan alınarak eksen başlığına doğru itilir ve ısıtılmış bir nozul aracılığıyla eritilerek katman katman platform üzerine serilir. Nozul, üç eksenli (X, Y, Z) bir sistemde hareket ederek plastik malzemenin üst üste birikmesiyle üç boyutlu bir model oluşturur. FDM teknolojisi, kullanılan malzeme türüne ve işlem sırasında harcanan enerji miktarına göre görece daha düşük maliyetli bir üretim süreci sunar. Bu özelliği hem endüstriyel kullanımda hem de bireysel uygulamalarda (örneğin ev tipi yazıcılarda) yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır. Kullanım kolaylığı, düşük ekipman maliyeti ve geniş malzeme yelpazesi, FDM yazıcıları özellikle prototipleme ve eğitim amaçlı uygulamalarda öne çıkarmaktadır. Ancak, bu teknolojinin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Katmanların sırayla biriktirilmesi nedeniyle, platforma temas etmeyen, yani havada asılı kalan geometrilerde destek yapıları gereklidir. Bu destekler, aynı malzemeden veya çift nozullu sistemlerde farklı bir malzemeden üretilebilir. Platform üzerine katman katman biriktirilerek üretim yapılması bir destek grubu ihtiyacı oluşturmaktadır. Platforma temas etmeyen havada asılı kalan cisim yüzeyleri desteklenmeden üretilmesi mümkün değildir. Destekli modelleme yapılarak çift nozulle kullanılırsa farklı malzemelerden destek grupları yapılır. Yazım işlemi bittikten sonra bu destek grupları çıkartılarak son işlem uygulanır. Ayrıca, farklı termoplastik malzemelerin farklı termal genleşme özelliklerine sahip olması nedeniyle, özellikle yüksek sıcaklık farklarında çatlak oluşumu gibi problemler yaşanabilir. Bu da ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir. Termal olarak farklı sıcaklıklarda kullanılan malzemede çatlaklar oluşabilir bu durum olumsuz yönlerindendir. FDM teknolojisinde en yaygın kullanılan malzemelerden ikisi Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polilaktik Asit (PLA)'dir. Bunun dışında polikarbonat (PC), poliamid (Nylon), termoplastik poliüretan (TPU) gibi diğer polimer türevleri de farklı uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Polimer grubundan diğer

malzemelerde kullanımı yaygındır (Curodeau ve diğerleri, 2000, Muller ve Karevska, 2016; Stansbury ve Idacavage, 2016; Syed ve diğerleri, 2017; Uğur ve diğerleri, 2017).

ISO/ASTM 52900 Sınıflandırması kullanılarak yedi teknolojinin karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. 3B baskı yöntemleri karşılaştırma tablosu (ISO/ASTM 52900 sınıflandırması)

Yöntemlerin Sınıflandırılması	Teknik adı	Çalışma Prensibi	Enerji/ Mekanizma	Malzeme Türleri	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulama Alanları
Bağlayıcı püskürtme	Binder Jettinf	Sıvı bağlayıcının toz yatak üzerine püskürtülmesi	Mürekkep püskürtme başlığı	Metal seramik, kum, kompozit	Destek gerektirmez, çoklu parça üretilebilir	Düşük dayanım, bağlayıcı sonrası sintirleme gerekmektedir	Kalıp, prototipleme, döküm modelleri
Yönlendirilmiş Enerji Birikimi	Directed Energy Deposition (DED)	Metal toz veya telin lazer/plazma/elektron ışını ile eritilmesi	Lazer, plazma, elektron ışını	Metal toz, tel (ör. titanyum, çelik)	Parça onarımı, hibrit üretim, güçlü yapılar	Yüksek maliyet, düşük detay çözünürlüğü	Havacılık, savunma, bakım/onarım
Malzeme Püskürtme	Material Jetting	UV ile kürlenen sıvı reçinenin katman katman püskürtülmesi	UV ışık, yazıcı kafası	Foto polimerler	Çok yüksek detay, pürüzsüz yüzey, çoklu renk/malzeme seçeneği	Yüksek maliyet, zayıf mekanik dayanım	Mikro mekanik, prototipleme, tıbbi modeller
Toz Yatak Füzyonu	SLS, EBM, SHS	Toz malzemenin lazer/elektron ışınıyla sinterlenmesi veya eritilmesi	Lazer veya elektron ışını	Polimer, metal, seramik tozlar	Desteksiz karmaşık geometri, güçlü parçalar	Yavaş üretim, yüksek enerji ve ekipman maliyeti	Havacılık, otomotiv, tıbbi implant
Levha Laminasyonu	LOM, UAM	Katman katman levhaların kesilip yapıştırılması ya da ultrasonik kaynakla birleştirilmesi	Lazer, bıçak, ultrasonik titreşim	Kâğıt, plastik, metal folyolar	Düşük maliyet, büyük boyutlu üretim, atık azaltımı	Düşük çözünürlük, sınırlı malzeme kombinasyonu	Mimari modeller, görsel prototipler
Vat Foto polimerizasyonu	SLA, DLP	Fotoreaktif reçinenin lazer veya projektörle sertleştirilmesi	Lazer, UV, LED projektör	Sıvı foto polimer reçineler	Yüksek hassasiyet, pürüzsüz yüzey, mikron detaylar	Reçine maliyeti, sınırlı dayanım	Dental, takı, tıbbi cihazlar
Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Isıtılmış termoplastik filamentin nozulla katman katman biriktirilmesi	Isıtma bloğu ve mekanik itici	PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon	Düşük maliyet, yaygın kullanım, ev tipi yazıcılarla uyumlu	Katman izleri, destek ihtiyacı, termal genleşme sorunları	Hızlı prototipleme, eğitim, ev kullanımı

Çalışmada yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan FDM teknolojisi kullanılarak 3 boyutlu üretim gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde PLA tabanlı filament tercih edilmiş, destek yapıları otomatik olarak oluşturulmuş ve baskı sonrası temizlik işlemi uygulanmıştır. Üretim parametreleri, parça geometrisi ve kullanım amacına uygun şekilde optimize edilmiştir.

2.2. Filament türleri

Son yıllarda 3B yazıcı teknolojisinde kullanılan filament türleri yazıcı türüne, üretim amacına ve malzeme özelliklerine göre değişiklik gösterir. Katmanlı üretim teknolojilerinin en yaygın ve erişilebilir türlerinden biri olan Fused Deposition Modelling (FDM) sistemlerinde üretimin temel girdisi olan filamentler, 3B yazıcının başarısını doğrudan etkileyen en önemli malzemelerdendir. Filamentler; polimer esaslı, esnek ya da sert, mühendislik sınıfı ya da biyolojik olarak çözünebilen farklı özelliklerde üretilebilmektedir. Her filament türü; mekanik dayanım, termal kararlılık, esneklik, yüzey kalitesi, baskı kolaylığı ve çevresel etkilere karşı direnç gibi farklı teknik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, üretilecek parçanın kullanım amacı ve çalışma koşullarına göre uygun filamentin seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Uğur ve diğerleri, 2017).

2.2.1. Polimerler

FDM ve genel 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılan filament türleri, genellikle termoplastik polimerler sınıfına girer. "Polimer" terimi, monomer adı verilen küçük moleküllerin uzun zincirler hâlinde birleşmesiyle oluşan büyük molekülleri ifade eder. Polimerlerin malzeme türleri arasında; kolay şekillendirilmesi, kuvvet etkisi altında şekil değişimi yapması, düşük sıcaklıklarda erimesi, ucuz olması gibi özellikleri filamentler için tercih sebebi olması için yeterlidir. Polimerlerden oluşan kompozit ürünlerin ar-ge çalışmaları yapılmaktadır. Polimerler göreceli olarak diğer filamentlere göre daha ucuz ve basımının kolay olması destek filamentler olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Caminero, Chacon, Garcia-Moreno ve Rodriguez, 2018; Xin, Man, Zuowan, Jihua ve David, 2017). FDM teknolojisinde yaygın olarak kullanılan PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon, PC, HIPS, PVA, CF ve ASA gibi filament türleri teknik özellikleri ve kullanım alanlarıyla birlikte Çizelge 2.2 de verilmiştir.

Katmanlı üretim teknolojilerinde, özellikle FDM (Eriterek Biriktirme Modelleme) yöntemiyle çalışan 3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeleri, üretilecek parçanın

mekanik dayanımı, çevresel dayanıklılığı ve yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle doğru filament seçimi, üretimin başarısını büyük ölçüde belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan veya incelenen başlıca filament türleri aşağıda açıklanmıştır.

Polilaktik Asit (PLA), mısır nişastası ve şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen, biyobozunur bir termoplastik polimerdir. Polilaktik asit (PLA) en çok tercih edilen filament türlerindendir. İçerisinde laktik asit bulunması sebebiyle bakteri veya mantarlar ile etkileşime girebilir. Su içerisinde tanklarda ya da nemli ortamda kalması bu süreci hızlandırmaktadır. FDM teknolojisinde en yaygın kullanılan filament olan PLA, düşük baskı sıcaklıklarıyla çalışabilir ve warping (bükülme) problemi oldukça düşüktür. Yazım sırasında hoş bir koku yayar ve iç mekân kullanımı için oldukça uygundur. Ucuz, bulunması ve temini kolay bir malzeme olması sebebiyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, düşük esnekliği, sınırlı mekanik dayanımı ve UV ile ısıya karşı zayıf direnci nedeniyle dış ortam uygulamalarında tercih edilmez. Genellikle prototipleme, eğitim modelleri ve dekoratif baskılar gibi alanlarda kullanılır.

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), dayanıklı ve sert bir plastik olup endüstriyel üretimlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Yüksek ısı dayanımı ve darbelere karşı mukavemeti ile dikkat çeken ABS, sonradan işlenebilir olması (zımparalama, yapıştırma, boyama gibi işlemler) açısından avantaj sağlar. Ancak, baskı sırasında kötü koku yayması ve yüksek oranda warping eğilimi göstermesi nedeniyle, baskı ortamında havalandırma gerektirir ve tercihen kapalı hazneli yazıcılarda kullanılmalıdır. Sertleştiğinde termal çatlaklar ayrışmalar gibi sorunlara neden olabilir. Sert ve gevrek yapısı her türlü parça için ideal bir durum değildir. Ucuz, bulunması kolay olması ve bu teknolojinin PLA ile ilk akla gelen filamentlerden olması onu başlangıç filamentlerinden yapmaktadır. Otomotiv parçaları, fonksiyonel prototipler ve dayanıklı muhafazalar ABS'nin sık kullanıldığı alanlardır.

Polietilen Tereftalat Glikol (PETG), PET malzemesinin glikol ile modifiye edilmiş halidir ve PLA ile ABS arasında bir konumda yer alır. Hem dayanıklı hem de esnek yapısıyla dikkat çeken PETG, suya ve kimyasallara karşı dirençlidir. Ayrıca, UV ışınlarına karşı da koruma sağladığından dış mekân uygulamalarına uygundur. PLA kadar kolay yazdırılabilirken, ABS'ye yakın mekanik özellikler sunar. Yüzeyde ipliklenme (stringing) problemi

yaşanabilse de baskı kalitesi genel olarak yüksektir. Gıda ambalajları, su şişeleri ve dayanıklı fonksiyonel parçalar PETG'nin başlıca kullanım alanlarıdır.

Termoplastik Poliüretan (TPU), elastomer sınıfında yer alan, oldukça esnek ve lastik benzeri bir yapıya sahip filament türüdür. Yüksek elastikiyetinin yanı sıra aşınma ve darbe dayanımıyla da öne çıkar. Yağlara, kimyasallara ve dış etkenlere karşı dirençlidir. Ancak, esnek yapısı nedeniyle baskı sırasında düşük hız gerektirir ve özellikle Bowden sistemli yazıcılarda ekstrüzyon sorunları yaşanabilir. Doğru parametrelerle yazıldığında oldukça başarılı sonuçlar verir. TPU genellikle contalar, telefon kılıfları, ayakkabı tabanları ve esnek prototiplerde kullanılır.

Poliamid (Nylon/PA), yüksek mukavemetli, esnek ve aşınmaya karşı oldukça dayanıklı bir mühendislik polimeridir. Esneklik ve sertlik arasında iyi bir denge sunar. Mekanik dayanımı son derece yüksek olan Nylon, özellikle yük taşıyan parçalar ve mekanik elemanlarda tercih edilir. Ancak, nem çekmeye yatkın olması nedeniyle yazdırılmadan önce kurutulması gerekir. Ayrıca warping eğilimi yüksektir ve baskı tablasına yapışması zordur. Dişliler, menteşeler, teknik bağlantı parçaları gibi dayanım gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır.

Polikarbonat (PC) ise yüksek sıcaklık dayanımı (110–130°C) ve darbelere karşı mukavemetiyle bilinen bir mühendislik sınıfı filamenttir. Polikarbonat malzemesi aynı zamanda optik şeffaflık sağlayabilir, bu nedenle hem mekanik hem de estetik gereksinimlerin karşılandığı uygulamalarda kullanılır. Warping eğilimi oldukça yüksek olduğundan, kapalı hazneli yazıcılarda, yüksek sıcaklıklarda baskı alınması gerekir. Teknik bileşenler, aydınlatma parçaları ve yüksek sıcaklık altında çalışması gereken prototiplerde yaygın olarak tercih edilir. Filament türlerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2’ de verilmiştir (Verbatim, 2025).

Çizelge 2.2. Filament türleri

Flament türeü	Malzeme	Özellikleri	Kullanım alanları
PLA	Polilaktik Asit *(Polylactic Acid)*	Biyobozunur, kolay basılır, düşük sıcaklıkta erir, çevre dostudur.	Prototip, mimari modeller, ev tipi yazıcılar
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren	Dayanıklı, ısıya dirençli, sert; ama warping (bükülme) riski vardır.	Otomotiv parçaları, oyuncaklar (LEGO), mühendislik uygulamaları
PETG	Polietilen Tereftalat Glikol	Dayanıklı, esnek, suya ve kimyasallara karşı dirençli, gıda teması uygundur.	Su şişeleri, gıda kapları, mekanik parçalar
TPU	Termoplastik Poliüretan	Esnek, darbeye dayanıklı, lastik benzeri yapı	Telefon kılıfları, ayakkabı tabanları, conta ve sızdırmazlık ürünleri
NYLON (PA)	Poliamid	Yüksek dayanım, aşınma direnci, kimyasallara karşı dirençlidir.	Dişliler, menteşeler, mekanik parça üretimi
PC	Polikarbonat	Yüksek sıcaklık ve darbe dayanımı, şeffaf üretim yapılabilir.	Elektriksel bileşenler, yüksek dayanımlı prototipler
HIPS	Yüksek Darbe Dayanımlı Polistiren	ABS ile destek malzemesi olarak çözünür (limonende)	Çift ekstrüzyonu yazıcılarda destek yapısı
PVA	Polivinil Alkol	Su ile çözünebilir destek malzemesi	PLA ile geçici destek yapılar
CF Filamentler	Karbon Fiber takviyeli filamentler (ör. PLA-CF, Nylon-CF)	Artırılmış rijitlik ve dayanım, ancak daha aşındırıcıdır.	Havacılık, otomotiv, mühendislik uygulamaları
ASA	Akrilonitril Stiren Akrilat	UV ışınlarına ve dış hava koşullarına dayanıklı	Dış mekân uygulamaları, otomotiv kaplama parçaları

Filament türleri arasında yapılacak seçim, üretilecek parçanın kullanım amacı, maruz kalacağı çevresel koşullar ve ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere göre belirlenmelidir. Bu çalışmada özellikle PETG ve TPU gibi polimer esaslı filamentler, farklı kafes yapı konfigürasyonları ile kullanılarak, harç içinde takviye elemanı olarak denenmiştir.

2.2.2. Metaller

Üç boyutlu yazıcı teknolojileri günümüzde prototiplemeden seri üretime kadar geniş bir yelpazede kullanılmakta olup, bu teknolojinin metal malzemelere uygulanması, endüstriyel dönüşüm açısından en kritik gelişmelerden biri olarak değerlendirilmektedir. Plastik ve polimer esaslı malzemelerle üretim yapmak, modelleme ve tasarım açısından önemli avantajlar sağlarken, yapısal dayanım, ısı direnci ve uzun ömür gibi mekanik gereklilikler

söz konusu olduğunda metal malzemelerin tercih edilmesi kaçınılmaz hâle gelmektedir. Bu bağlamda, metallerin üç boyutlu yazıcılarla üretilebilmesi; yalnızca geleneksel üretim yöntemlerine alternatif değil, aynı zamanda daha esnek, verimli ve tasarım odaklı bir üretim anlayışının da kapılarını aralamaktadır.

Metal malzemelerin üç boyutlu yazıcılarla üretimi, kalıp ve takım tezgâhı gereksinimini ortadan kaldırarak, özellikle prototipleme ve özelleştirilmiş parça üretimi süreçlerini hızlandırmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, uzay ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde, metal yazıcılar ile özgün tasarımlar oluşturulmakta ve üretim süreçlerinde esneklik sağlanmaktadır. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi oldukça zor ya da zaman alıcı olan kompleks geometrilere sahip parçaların, 3B yazıcılarla doğrudan metal tozlarından üretilebilmesi hem maliyetleri düşürmekte hem de zaman kazancı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, yedek parça üretimi gibi hızlı müdahale gerektiren durumlarda da bu teknoloji büyük avantaj sunmaktadır.

Gelişmiş metal yazıcılar, artık yalnızca tek tip metallerle değil; çeşitli alaşımlarla da çalışabilecek kapasiteye ulaşmıştır. Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum alaşımları, kobalt bazlı alaşımlar ve nikel bazlı süper alaşımlar gibi yüksek dayanım ve özel fiziksel-kimyasal özellikler gerektiren malzemeler, metal 3B yazıcılarla başarıyla üretilebilmektedir. Bu malzemelerin yazdırılabilir hâle getirilmesi, yüksek sıcaklıklarda lazer veya elektron ışını gibi enerjilerle tozun ergitilmesi yoluyla sağlanmaktadır. Özellikle Titanyum, biyouyumluluğu ve korozyon direnci sayesinde tıbbi implantlarda en yaygın kullanılan metal malzeme hâline gelmiştir. Vücut içinde uzun süre kalabilen titanyum parçalar; kemik protezleri, diş implantları ve ortopedik vidalar gibi hassas uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, hafiflik ve yüksek dayanım oranı sayesinde havacılık ve uzay endüstrilerinde tercih sebebi olmaktadır (Trevisan ve diğerleri, 2018).

Nikel bazlı alaşımlar ise yüksek sıcaklık direnci ve oksidasyona karşı dayanıklılığı nedeniyle jet motor parçaları, ısı değiştiriciler ve egzoz sistemleri gibi yüksek ısıya maruz kalan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu alaşımlar, yüzeyde parlak ve estetik bir kaplama sağlaması açısından mimari ve dekoratif uygulamalarda da tercih edilmektedir. Kobalt bazlı alaşımlar da benzer şekilde aşınma, korozyon ve ısıya karşı dirençleriyle özellikle enerji ve tıp sektörlerinde öne çıkmaktadır (DebRoy ve diğerleri, 2018).

Metal yazıcı teknolojisinin bir diğer önemli yönü, özel parça üretiminde malzeme israfını azaltmasıdır. Geleneksel üretim yöntemlerinde talaş kaldırma işlemiyle istenilen forma ulaşılırken, metal 3B yazıcılarda sadece gerekli olan malzeme kullanılır. Bu yönüyle hem sürdürülebilir üretim süreçleri desteklenmekte hem de ekonomik verimlilik sağlanmaktadır. Ayrıca toz hâlinde kullanılmayan metal materyallerin geri dönüştürülebilir olması, çevresel etkiyi de azaltmaktadır (Murr, 2016; Uhlmann, Kersting, Klein, Cruz ve Borille, 2015).

Sonuç olarak, metal malzemelerle yapılan katmanlı üretim; mühendislik dünyasında sınırları zorlayan, tasarımsal özgürlüğü artıran ve üretim süreçlerini optimize eden stratejik bir teknolojidir. Bu alanın gelişimi, önümüzdeki dönemde endüstriyel üretim paradigmalarının yeniden şekillenmesine katkı sağlayacak niteliktedir (DebRoy ve diğerleri, 2018; Horst, Duvoisin ve Viera, 2018; Hitzler ve diğerleri, 2018; Martin ve diğerleri, 2017; Murr, 2016; Uhlmann, Kersting, Klein, Cruz ve Borille, 2015).

2.2.3. Seramikler

Seramikler, metallerden ve polimerlerden farklı olarak çok daha yüksek sıcaklıklara, kimyasal inertliğe ve sertliğe sahip olan, kristal yapılı ya da amorf yapılı malzemelerdir. Genellikle organik olmayan ve metal dışı bileşiklerden oluşurlar. Seramiklerin üç boyutlu yazıcılarda kullanımı, gelişen üretim teknolojilerinin önemli bir parçası haline gelmiş olup, bu malzemelerin termal kararlılık, yüksek mekanik mukavemet, yüksek erime noktası, kimyasal direnç ve yangına dayanıklılık gibi özellikleri onları ileri mühendislik uygulamaları için oldukça cazip hale getirmektedir (Zocca, Lima ve Günster, 2017).

Her ne kadar seramiklerin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler onları üstün kılsa da 3B baskı süreçlerinde kullanımları belirli zorlukları da beraberinde getirir. Seramikler, plastik veya metal malzemelere göre daha az şekillendirilebilir, daha az akışkan ve daha kırılgan oldukları için baskı işlemi sırasında hassas kontrol gerektirir. Özellikle katmanların üst üste bindirilmesiyle oluşturulan yapılar havuzlanma, çatlama, katman kayması gibi problemlerle karşılaşabilir (Curodeau ve diğerleri, 2000).

En yaygın kullanılan yöntemlerden biri, seramik tozlarının polimer bağlayıcılarla karıştırılarak macun veya bulamaç haline getirilmesidir. Bu karışım daha sonra ekstrüzyon veya mürekkep püskürtme yöntemleriyle yapılandırılır. Ancak, kullanılan bulamaçların

viskozitesi ve akışkanlık değerleri çok iyi ayarlanmalıdır. Aksi takdirde, baskı sırasında deformasyonlar oluşur ve parçaların stabilitesi bozulur. Ayrıca seramik yapılar genellikle baskıdan sonra yüksek sıcaklıkta sinterleme veya pişirme işlemine tabi tutulur. Bu süreç hem mukavemetin artırılmasını hem de nihai yoğunluğun elde edilmesini sağlar. Ancak sinterleme sırasında oluşan büzülmeler veya sıcaklık farkına bağlı olarak oluşabilecek termal çatlaklar üretim kalitesini olumsuz etkileyebilir. Seramiklerin üç boyutlu yazıcılarda kullanımı, yüksek sıcaklık dayanımı, biyolojik uyumluluk ve fonksiyonel çeşitlilik gibi avantajları ile dikkat çekerken; baskı sürecinde yaşanan teknik zorlukların özel proses kontrolü ve ileri malzeme bilimiyle aşılması gerekmektedir. Gelişen yazıcı teknolojileri ve yeni nesil bağlayıcı/sinterleme yöntemleriyle birlikte, seramiklerin 3B üretimdeki payı önümüzdeki yıllarda çok daha belirleyici olacağı açıktır (Wu ve diğerleri, 2011).

Seramik mürekkep baskılı çalışmalar ince katmanlı yapılar için kullanılmaktadır. Etkin madde ya da tozlar bulamaç haline getirilerek, akışkan vizkozitesi yüksek bir döküm yöntemi kullanılmaktadır. Katman katman seramik malzemenin basılması öncesinden seramik tozlarının ısıtılması, termal farklar nedeniyle çatlakların oluşmasının engelleyerek daha güzel basımlar sağlamaktadır. Yüksek teknoloji endüstrisi, mikroelektronik, havacılık, sağlık alanlarında seramik ürünlerin kullanılmaktadır. Diş implantları, protezler gibi birçok alanda seramik üç boyutlu yazıcılar da malzeme olarak tercih edilmektedir. Seramikler; havacılık, uzay, biyomedikal mühendisliği, enerji ve yüksek teknoloji sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Örneğin, seramik esaslı parçalar aşırı sıcaklığa maruz kalan jet motorlarında, diş ve kemik implantlarında, ısı yalıtımı uygulamalarında, hatta yüksek hassasiyetli mikroelektronik bileşenlerde kullanılmaktadır. Üstelik seramiklerin doğası gereği sertliği ve kırılganlığı, onları düşük çatlak yayılımı ve yüksek aşınma direnci gibi mekanik avantajlara sahip kılmaktadır. Uygun ve hızlı üretimi sayesinde kullanımı sürekli artmaktadır. Kemik ve benzeri yapıların oluşturulmasında protezler için benzer malzemelerin tercihinde seramikler kullanılmaktadır. Biyocam veya aktif cam kullanılan benzer modeller ve çalışmalar vardır (Curodeau ve diğerleri, 2000; Chen, Thompson ve Boccaccini, 2006; Derby, 2011; Dehurtevent ve diğerleri, 2017; Doreau, Chaput ve Chartier, 2000; Travitzky ve diğerleri, 2014; Kruth, Mercelis, Van Vaerenbergh, Froyen ve Rombouts, 2005; Owen ve diğerleri, 2018; Slots ve diğerleri, 2017; Wikes, Hagedom, Meiners ve Wissenbach, 2013; Wu ve diğerleri, 2011; Zocca ve diğerleri, 2017).

2.2.4. Kompozitler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı özellikteki malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, birleştikleri zaman her bir bileşenin en iyi özelliklerini taşıyan yeni bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, genellikle bir matris (bağlayıcı) faz ve bu matris içinde dağılmış olan takviye (fiber, partikül, örgü vs.) fazdan oluşur. Matris genellikle polimer, metal veya seramik olabilirken; takviye malzemesi karbon fiber, cam fiberi, aramid fiber (Kevlar) gibi yüksek dayanımlı malzemelerden oluşabilir. Kompozitler, hafiflik ile yüksek dayanım, aşınma direnci, termal stabilite ve mekanik bütünlük gibi özellikleri bir arada sunar (Yumak, Pekbey ve Aslantaş 2013).

Üç boyutlu yazıcı teknolojileri ile kompozitlerin üretilmesi, geleneksel yöntemlerle elde edilmesi zor olan özelleştirilmiş, karmaşık geometriye sahip parçaların hızlı ve verimli bir şekilde imal edilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle polimer matrisli kompozitler (PMC), 3B baskı ile yaygın olarak üretilebilmektedir. Polimer içerisine karbon fiber (CF), cam fiber (GF), veya aramid fiber gibi takviyelerin eklenmesiyle mekanik mukavemeti yüksek, hafif yapılar elde edilebilmektedir. Bu yapıların otomotiv, havacılık, savunma sanayi, spor ekipmanları ve inşaat mühendisliği gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaları mümkündür. Örneğin; karbon fiber takviyeli PLA (Carbon Fiber Reinforced PLA), geleneksel PLA'ya göre çok daha sert ve ısıya dayanıklı yapıdadır. Benzer şekilde, naylon + karbon fiber kombinasyonu, esneklik ile darbe dayanımı da sağlar. Kompozit filamentlerin nozulda tıkanma gibi üretim zorlukları bulunsa da bu tür malzemeler doğru ekipman ve ayarlamalarla yüksek performanslı prototiplerin ve son ürünlerin elde edilmesini sağlar (Valvez, Santos, Parente, Silva ve Reis, 2020).

Kompozit yapılarda kullanılan takviye türleri, kompozitin performans özelliklerini doğrudan belirleyen en önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Kompozit malzemeler genellikle matris fazı içerisinde yer alan ve bu faza mekanik, termal veya kimyasal dayanım kazandıran çeşitli takviye elemanlarıyla güçlendirilir. Bu takviye elemanları başlıca dört grupta toplanabilir. İlk olarak, fiber (lif) takviyeler, kompozitin çekme mukavemetini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmakta olup; karbon fiber, cam elyafı ve aramid fiber (Kevlar) gibi yüksek dayanımlı malzemeleri içerir. İkinci olarak, partikül takviyeler, seramik tozları, metal tozları veya doğal mineral katkılar gibi ince partiküllerle kompozitin sertliği ve termal direncini artırmaya yöneliktir. Üçüncü olarak, katmanlı kompozit sistemlerde, farklı

malzeme tabakaları belirli bir yönlendirme ile üst üste yerleştirilerek kompozitin belirli yönlerde üstün mekanik özellikler göstermesi sağlanır. Dördüncü olarak ise, süper matrisli sistemler, özellikle nanoteknoloji ile geliştirilen nanokompozit türlerini kapsamaktadır. Bu türlerde, çok ince yapılı (nano boyutta) destek malzemeleriyle yüksek yüzey alanı etkisi elde edilir, bu da kompozitin dayanım, esneklik ve ısıl iletkenlik gibi özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. 3B yazıcı teknolojileri açısından değerlendirildiğinde, bu takviye türlerinin filament içerisine homojen bir şekilde dağılması büyük önem taşır. Aksi halde, kompozit yapının mekanik bütünlüğü bozulabilir, baskı sırasında katmanlar arası zayıflıklar veya kırılgan bölgeler oluşabilir. Bu nedenle, takviye oranı, takviyelerin yönelimi ve boyutları dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir (Valvez ve diğerleri, 2020).

Kompozit malzemelerin üç boyutlu yazıcılarla üretimi, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha esnek, hızlı ve özelleştirilebilir bir üretim süreci sunmaktadır. Bu üretim genellikle FDM teknolojisiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemde, takviye malzemesiyle geliştirilmiş kompozit filamentler doğrudan yazıcının nozuluna gönderilir ve burada eritilerek katman katman yapı inşa edilir. Kompozit filamentler, termoplastik matris içinde dağılmış kısa cam elyaf, karbon fiber veya metal tozu gibi takviyeler içerebilir. Bu yapı sayesinde basılan ürün hem matrisin şekil verilebilirliğini hem de takviyelerin mekanik performansını bir arada taşır (Çelik ve Gür, 2021).

Buna ek olarak, son yıllarda geliştirilen CFF (Continuous Fiber Fabrication–Sürekli Fiber Üretimi) teknolojisi, baskı sırasında sürekli fiber takviyelerin doğrudan parçaya entegre edilmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji ile fiberlerin belirli yönlerde yerleştirilmesi sayesinde, parça içinde çok daha yüksek mukavemet ve rijitlik elde edilebilmektedir. CFF yöntemi, özellikle yapısal uygulamalarda, metal yerine kullanılabilecek kadar dayanıklı kompozit parçaların üretimini mümkün kılar (Gür, Çelik ve Sakin, 2024).

Alternatif olarak, vat fotopolimerizasyon teknikleri olan SLA (Stereolitografi) ve DLP (Dijital Işık İşleme) teknolojileri de kompozit üretiminde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, sıvı reçine içerisine mikro boyutta takviye partikülleri eklenerek fotopolimer esaslı yüksek hassasiyetli kompozit parçalar elde edilir. Bu yöntem, özellikle biyomedikal, mikromekanik ve dişçilik gibi yüksek hassasiyet ve düşük tolerans gerektiren alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Seramik tozlar, biyouyumlu fiberler veya nano katkılar gibi çok çeşitli takviyeler, reçine içerisine dağıtılarak mekanik, termal veya optik özellikler

geliştirilebilmektedir. Kompozit malzemeler, çok yönlü performansları sayesinde farklı sektörlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Özellikle hafiflik ve yüksek dayanım gibi özelliklerin bir arada gerektiği durumlarda tercih edilmektedir (Dokuz, Aydın ve Uyaner, (2021).

2.2.5. Özel malzemeler

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, farklı alanlarda kullanılan çok çeşitli malzeme türleriyle birlikte geniş bir ham madde yelpazesine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle uzay araştırmaları kapsamında, "lunar tozu" veya "Mars tozu" olarak adlandırılan malzemeler, gidilmesi planlanan gezegenlerin ve uyduların yüzeyinde bulunan tozları ifade eder. Bu tozların üç boyutlu yazıcılarla yapı malzemesi olarak kullanılması, NASA ve diğer uzay ajanslarının koloni kurma hedeflerinde kritik bir rol oynamaktadır. Uzayda bulunan mevcut yüzey malzemesinin değerlendirilmesi, hem lojistik açıdan büyük avantaj sağlar hem de yerleşim ve inşaat süreçlerinin sürdürülebilirliğini artırır. Bu nedenle, gezegen yüzeyindeki tozların kullanılmasıyla yapılacak yapılar, ileri teknoloji ürünü olan üç boyutlu baskı sistemleri ile mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, uzay görevlerinde ortaya çıkabilecek arıza ve ihtiyaç durumlarında, yedek parça veya ekipman üretiminin yerinde yapılabilmesi de bu teknolojinin sunduğu önemli bir avantajdır. Uzay ortamında kullanılabilecek çok çeşitli toz bazlı malzemeler, bu kapsamda araştırılmakta ve geliştirilmektedir (Cesaretti, Dini, Kestelier, Colla ve Pambaguian, 2014; Hedayati ve Stulova 2023; Meurisse, Makaya, Willsch ve Sperl, 2018).

Gıda teknolojisi alanında ise, sürdürülebilir tarım ve artan dünya nüfusunun beslenme ihtiyaçları doğrultusunda, üretimi kolay ve çevre dostu yiyecek maddeleri geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Özellikle et üretimi hem maliyetli hem de yüksek doğal kaynak tüketimine neden olan geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Mevcut talebin karşılanamaması ve kaynakların hızlı tükenmesi, yapay et ve alternatif protein kaynaklarının önemini artırmaktadır. Üç boyutlu yazıcılar kullanılarak geliştirilen suni et benzeri yiyecekler, talebe göre şekillendirilebilmekte ve üretimi giderek yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji, gelecekte gıda üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması ve kaynakların etkin kullanımı açısından büyük potansiyele sahiptir (Dick, Bhandari ve Prakash 2019; Ramachandraiah, 2021).

Sağlık sektöründe ise organik materyallerin kullanımı ön plandadır. Hastaların protez ihtiyaçları, organ ve doku nakilleri gibi alanlarda üç boyutlu yazıcıların kullanımı giderek artmaktadır. Araştırmacılar, biyouyumlu polimerler ve hücresel yapılarla desteklenen organik maddeleri kullanarak, kişiye özel organ ve doku üretimini hedeflemektedir. Bu gelişmeler, özellikle transplantasyon bekleyen hastalar için umut vadetmekte ve medikal alanda devrim niteliğinde yenilikler sağlamaktadır (Liu ve Wang 2020; Yi ve diğerleri, 2017).

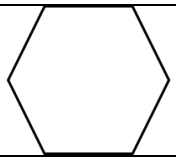
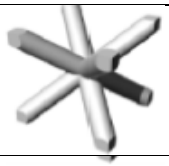
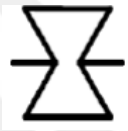
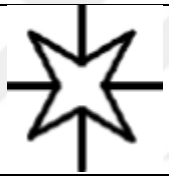
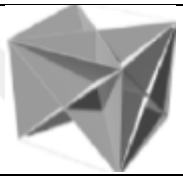
Bunların yanı sıra, tekstil sektörü ve akıllı malzemeler alanı da üç boyutlu baskı teknolojilerinden önemli ölçüde faydalanmaktadır. Fonksiyonel, esnek ve çevresel koşullara uyum sağlayabilen akıllı tekstil ürünleri geliştirmek için bu teknolojiler kullanılmakta, böylece hem estetik hem de performans açısından yenilikçi çözümler ortaya konmaktadır. Üç boyutlu yazıcıların bu geniş uygulama alanları, teknolojinin çok yönlülüğünü ve gelecekte yaşamın pek çok alanında oynayacağı kritik rolü göstermektedir.

2.3. Kafes Türleri

Kafes yapılar, hücresel malzemeler grubuna dahil olan özel bir yapı türüdür. Hücresel malzemelerin ilk bilimsel gözlemi 1665 yılında ölü mantar dokusunu inceleyen Hooke tarafından gerçekleştirilmiştir (Leary, 2020). Pan, Han ve Lu (2020)'nun belirttiği gibi hücresel malzemeler, temel olarak gözenekli yapılar olarak tanımlanırlar ve köpükler, bal peteği benzer yapılar ile kafes sistemini oluştururlar. Doğada da bal peteği, bitki gövdesi, kemik dokusu ve sünger gibi malzemeler bu tür yapılara örnek verilebilir. Bu yapıların kullanımıyla malzemeye optimum kullanım ve fonksiyonellik sağlanmaktadır (Zheng ve diğerleri, 2014). Diğer yandan, sodyum klorür (NaCl) bileşiğinin mikro yapısı, yüzey merkezli kübik kristal özelliği gösteren yapıya örnek olarak bazı kristal yapılar da kafes modeli olarak ele alınabilir (Yin ve diğerleri, 2023).

2.3.1. Kafes yapıların sınıflandırılması

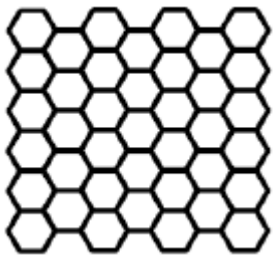
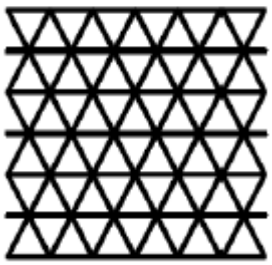
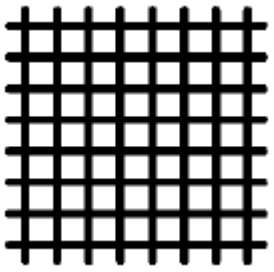
Yin ve diğerleri (2023) tarafından oluşturulan birim kafes hücre çeşitleri “iki boyutlu kafes hücre ve üç boyutlu kafes hücrelerdir (Şekil 2.1). Bu yapıların özellikleri aşağıda verilmiştir.

İki boyutlu-2B- kafes hücre		Üç boyutlu-3B- kafes hücre	
İki boyutlu birim kafes hücre		Kiriş temelli birim kafes hücre	
		İçi boş kiriş birim kafes hücre	
Ökzetik birim kafes hücre		Üçlü periyodik minimum yüzey (UPMY) Kabuk tabanlı birim kafes hücre	
		Plaka temelli birim kafes hücre	

Şekil 2.1. 2B ve 3B birim kafes hücre çeşitleri (Yin ve diğerleri, 2023)

<u>İki boyutlu kafes yapılar</u>

Bal peteği türündeki imalatı kolayca yapılabilen yüksek dayanımlı kafes yapılardır. Yin ve diğerleri (2023) de iki boyutlu kafes yapıları geometrik şekillere göre adlandırılan; üçgen, dörtgen, kagome, elmas, dairesel ve sekizgen gibi farklı iki boyutlu yapıları önermişlerdir (Şekil 2.2).

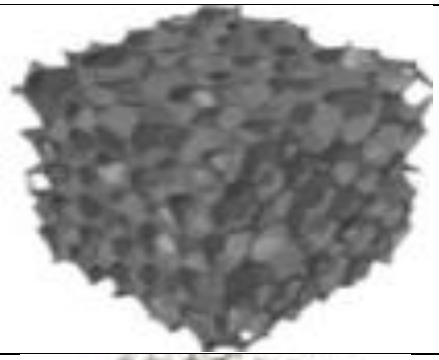
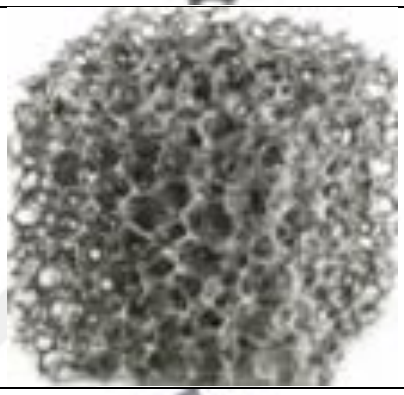
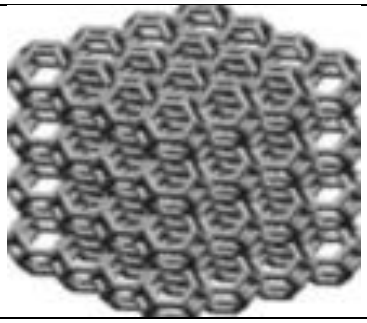
		
Bal Peteği Kafes Yapısı	Üçgen Kafes Yapısı	Kare Kafes Yapısı

Şekil 2.2. İki boyutlu örnek kafes yapılar (Yin ve diğerleri, 2023)

Üç boyutlu kafes yapılar

Kiriş temelli kafes yapı, içi boş kiriş temelli kafes yapı, plaka kafes yapı, üçlü periyodik minimum yüzeyleri içeren kafes yapı ve hiyerarşik kafes yapılar olarak sınıflandırılır. Bu yapılar, hacim içinde yer alan kiriş ve kirişleri birbirine bağlayan bir veya daha fazla kirişin birleştiği düğüm noktalarının birleşmesi ile oluşmuş esnek yapılardır (Borikar, Patil ve Kolekar, 2023). Kafes yapılar, geometrik çeşitliliği ve parametrik esnekliği sayesinde farklı mühendislik uygulamalarına uyarlanabilir niteliktedir. Özellikle bu yapıların temelini oluşturan kiriş elemanlarının boyutları, yönelimleri ve hacimsel dağılımları değiştirilerek, istenilen mekanik performansa uygun kafes sistemleri tasarlanabilmektedir. Bu tasarım özgürlüğü sayesinde yapısal rijitlik, enerji soğurma kapasitesi, darbe dayanımı veya esneklik gibi mekanik özellikler hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Hücresel malzemeler, yapısal düzenlenişlerine bağlı olarak temel olarak iki gruba ayrılır: rastlantısal yapılar ve periyodik yapılar. Periyodik yapılar, düzenli ve tekrarlayan birim hücrelerin oluşturduğu yapılar olup, bu sayede mekanik davranışları nümerik simülasyonlar ve analatik modeller kullanarak daha kolay ve kesin biçimde tahmin edebilir. Diğer yandan rastlantısal yapılar, düzensiz ve karmaşık hücre organizasyonuna sahiptir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için istatistiksel yaklaşımlar kullanılır. Her iki yaklaşım da kendi içinde ikiye ayrılır: açık hücreli ve kapalı hücreli kafes yapılar (Borikar ve diğerleri, 2023; Park, Min ve Roh, 2022). Sınıflandırma, hücresel malzemelerin mekanik ve fonksiyonel özelliklerinin anlaşılmasında yol göstericidir. Park ve diğerleri (2022), hücresel yapıların sınıflandırılmasını Şekil 2.3’teki gibi belirtmiştir.

Hücresel Yapılar	Rastlantısal Hücresel Yapılar	Kapalı hücre formu	
		Açık hücre formu	
	Periyodik Hücresel Yapılar	Kapalı hücre formu	
		Açık hücre formu	

Şekil 2.3. Hücresel yapıların sınıflandırılması (Park ve diğerleri,2022)

Açık hücreli kafesler (open-cell lattices)

Açık hücreli kafes yapılar, içi boş, üç boyutlu örgüsel yapılardır. Hücreler arasında boşluklar bulunur ve malzeme, sadece kafes elemanlarını oluşturur. Bu tür yapılar genellikle hafiflik ve enerji emme kapasitesi gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Hücrelerin şekli kübik,

tetrahedral, heksagonal gibi farklı poliedral formlarda olabilir. Örneğin, Octet-truss ve Kelvin hücresi bu yapılara örnektir. Havacılık, uzay, otomotiv sektörlerinde yapısal hafifletme amaçlı kullanılmaktadır.

Kapalı hücreli kafesler (closed-cell lattices)

Kapalı hücreli kafesler, hücrelerin içi tamamen veya büyük ölçüde kapalıdır. Yani hücre duvarları kalın plakalarla kaplanmıştır. Bu yapı, yüksek sıkıştırma dayanımı ve rijitlik sağlar ancak genellikle daha ağırdır. Kapalı hücreler ısı yalıtımı ve darbe emici özellikleriyle bilinir. Örneğin bal peteği yapısı (honeycomb) ve poligonal hücreler gibi. Isı yalıtımı, koruyucu kaplamalar, enerji soğurma uygulamalarında kullanılmaktadır.

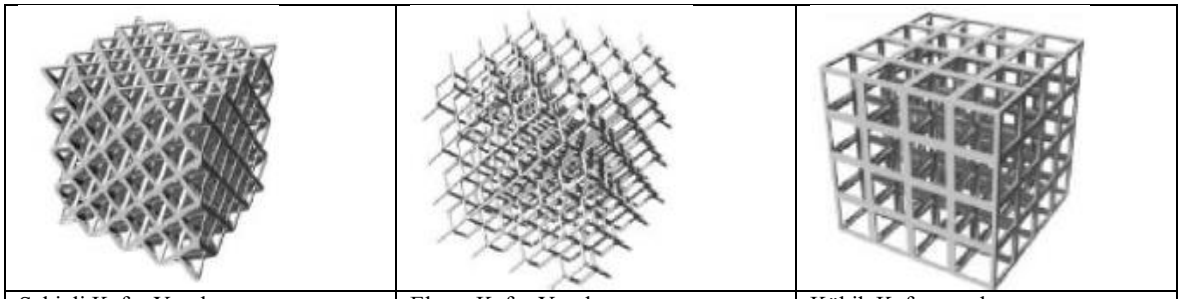
Düzenli (periyodik) ve düzensiz (aperiodik) kafesler

Belirli bir simetri ve tekrar eden geometrik birimlerden oluşur. Tasarımı ve analizi daha kolaydır. Genellikle endüstriyel üretimde tercih edilir. Düzensiz Kafesler: Rastgele veya kontrollü şekilde değişken birim hücre yapısına sahiptir. Daha karmaşık mekanik davranışlar sergiler ve biyomimetik uygulamalarda kullanılır.

Kafes yapılar, malzeme kullanımı ve tasarım açısından oldukça ekonomik çözümler sunar. Farklı geometrik form ve yapıdaki kafesler, mühendislik problemlerine özgü mekanik ve fonksiyonel çözümler sağlar. 3B yazıcı teknolojisinin gelişimi ile karmaşık kafes yapıları üretilebilir hale gelmiş, bu da özellikle hafif ve dayanıklı malzemeler ihtiyacı olan sektörlerde (havacılık, otomotiv, biyomedikal) kullanımını artırmıştır. Kafeslerin doğru seçimi, tasarımı ve üretimi, nihai ürünün performansı için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, kafes yapılar, doğadaki karmaşık hücresel yapılardan esinlenilerek geliştirilen ve insan eli ile tasarlanan mühendislik yapılarıdır. Kafes yapılar, diğer hücresel malzemelere kıyasla, mekanik dayanıklılık ve rijitlik açısından üstün özellikler gösterirler. Bu nedenle kafes yapılar, hafif ama yüksek performans gerektiren uygulamalarda avantajlar sağlamaktadır (Dong Tang ve Zhao, 2017). Diğer yandan kafes yapılar “iki boyutlu ve üç boyutlu kafes yapılar”, “üniform ve derecelendirilmiş kafes yapılar” ve “çoklu malzemeli kafes yapılar” olarak da sınıflandırılır.

2.3.2. Kafes yapıların boyutlarına göre sınıflandırılması

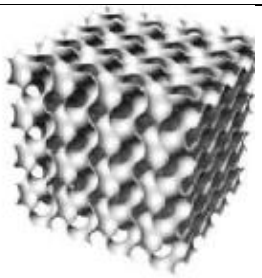
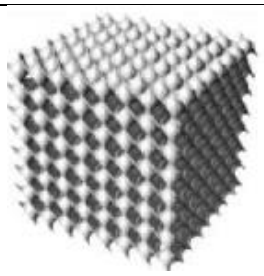
Kiriş temelli kafes yapılar arasında, literatürde yaygın olarak tanımlanmış ve incelenmiş birçok geometri bulunmaktadır. Bunlar arasında basit kübik (BK–SC) yapılar, düzenli ve simetrik yapılarıyla başlangıç seviyesi uygulamalarda tercih edilirken; hacim merkezli kübik (HMK–FCC) ve gövde merkezli kübik (GMK–FCC) gibi daha karmaşık yapılar, yük taşıma kapasitesi bakımından üstün performans sergileyebilir. Ayrıca, oktet (octet) düzgün sekizyüzlü kafes yapıları, yük taşıma verimliliğiyle dikkat çekerken, elmas (diamond) tipi yapılar hem mekanik hem de estetik özellikleri nedeniyle tercih edilebilmektedir. Bunlara ek olarak, eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron) yapılar, çok yüzlü geometrik yapıları sayesinde izotropik davranış gösterebilirken, iso-truss ve kelvin hücresi olarak bilinen yapılar, rijitlik ve malzeme verimliliği arasında optimal denge sunmaktadır. Daha özel bir yapı türü olan ökzetik (auxetic) kafes yapılar ise, negatif Poisson oranı göstererek sıkıştırıldıklarında genişleme özelliği sergiler. Bu özellik, özellikle biyomedikal implantlarda ve enerji emici sistemlerde yüksek avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, söz konusu kiriş temelli kafes yapıların bazı versiyonlarında kirişlerin iç kısımları boşaltılarak, daha hafif ancak yine de yapısal yeterliliği koruyan "içi boş kirişli" tasarımlar elde edilmektedir. Bu yapılar genellikle aynı isimle adlandırılır. Üç boyutlu kiriş kafes yapılarla ilgili görseller Şekil 2.4‘de verilmiştir (Yin ve diğerleri, 2023).



Sekizli Kafes Yapılar	Elmas Kafes Yapılar	Kübik Kafes yapılar

Şekil 2.4. Üç boyutlu kiriş kafes yapılar (Yin ve diğerleri, 2023)

Üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, yapı tasarımında mekanik performansı optimize etmek amacıyla kullanılan kafes yapı çeşitliliği önemli ölçüde artmıştır. Bu çeşitler arasında, Üçlü Periyodik Minimum Yüzeyler (ÜPMY) veya literatürdeki yaygın adıyla Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) olarak bilinen kabuk tabanlı kafes yapılar, yenilikçi çözümler sunmaktadır. TPMS yapılar, ortalama eğriliği her noktada sıfır olan geometrik yüzeylerden oluşan ve genellikle sabun köpüğü yapısına benzetilen ince membran benzeri yüzeylerdir (Şekil 2.5) (Yin ve diğerleri, 2023).

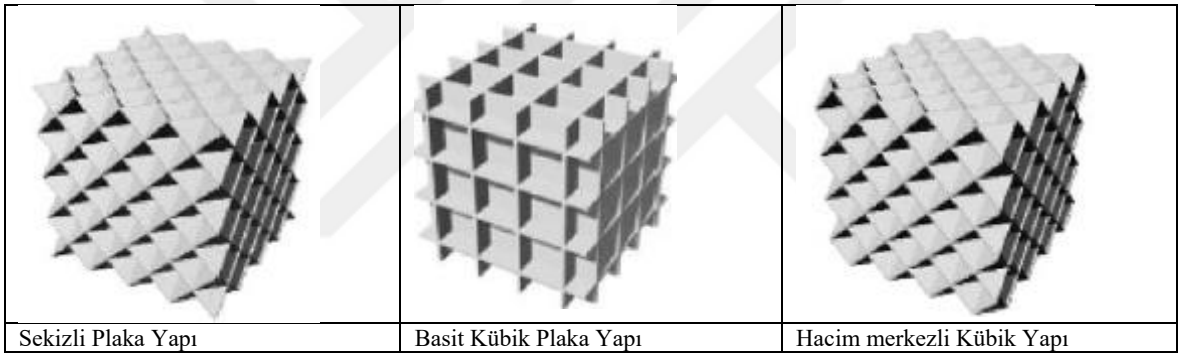
		
Girodial	Primitiv	Diamond

Şekil 2.5. ÜPMY kafes yapılar (Yin ve diğerleri, 2023)

Üçlü Periyodik Minimum Yüzeyler yapıların en ayırt edici özelliği, üç boyutta sürekli olarak tekrarlanabilmeleri ve belirli bir hacmi tamamen doldurabilecek şekilde geometrik süreklilik sağlayabilmeleridir (Leary, 2020). TPMS yapılar, geleneksel kiriş temelli kafes yapılardan farklı olarak, yük altındaki davranışlarında yüksek enerji sönümleme kapasitesi, homojen deformasyon ve kontrollü ezilme mekanizması gibi avantajlar sunar. Bu özellikleri sayesinde mekanik performansları öngörülebilir ve uygulamaya özel olarak ayarlanabilir niteliktedir. Kabuk yapının geniş yüzey alanı ve sürekli formu, dış yüklerin daha verimli bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu yönüyle TPMS yapılar hem hafiflik hem de dayanıklılık gerektiren uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Günümüzde TPMS yapılar, özellikle biyomedikal uygulamalar, doku mühendisliği iskeleleri (scaffolds), implant tasarımları, ısı eşanjörleri, enerji soğurma sistemleri ve filtreleme sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Borikar ve diğerleri, 2023). Eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu geometrik özgürlük sayesinde, bu karmaşık yapılar yüksek hassasiyetle üretilebilmektedir. En yaygın kullanılan TPMS geometrileri arasında Gyroid, Schwarz Diamond, Primitiv, IWP (Inverted Weaire–Phelan ya da GMK-BCC) ve FRD (Face-Centered Rhombic Dodecahedron, yani FCC-HMK bulunmaktadır. Her biri, farklı mekanik özellikler ve uygulama gereksinimlerine göre avantajlar sunan bu yapılar, mühendislik ve tasarım alanlarında esnek bir çözüm platformu olarak değerlendirilmektedir.

Plaka tabanlı kafes yapılar, belirli yönelimlere sahip plakaların, üç boyutlu bir hacim içerisinde düzenli şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulan yapısal sistemlerdir. Bu tür yapılar, geometrik açıdan düzlemsel yüzey elemanlarının tekrarı ile elde edilen kafes formları olup, yapısal davranış bakımından kiriş temelli ve kabuk tabanlı kafes sistemlerden belirgin biçimde ayrılırlar. Plaka temelli kafeslerin öne çıkan en önemli özelliklerinden biri, yüksek mekanik dayanım göstermeleri ve üstün enerji sönümleme yetenekleridir. Bu avantaj, özellikle darbe emilimi veya çarpışma koruması gibi fonksiyonel uygulamalarda plaka temelli kafesleri ideal bir çözüm

haline getirmektedir (Wu, Zhang, Sun, Chen ve Zhang 2023a). Ancak bu yapılar, yüksek deformasyonlara karşı sınırlı toleransa sahip olmalarıdır. Bu nedenle büyük elastik şekil değişimlerinin beklendiği uygulamalarda, plaka temelli yapılardan ziyade kiriş temelli veya TPMS (ÜPMY) yapılar tercih edilmektedir. Yine de yüksek rijitlik, yük taşıma kapasitesi ve yüksek özgül mukavemet gerektiren mühendislik uygulamalarında plaka temelli kafeslerin performansı dikkat çekicidir. Literatürde yaygın olarak çalışılan plaka tabanlı kafes yapılar arasında; basit kübik (Simple Cubic BS–SC), gövde merkezli kübik (Body-Centered Cubic GMK–BCC), hacim merkezli kübik (Face-Centered Cubic HMK–FCC), düzenli sekizyüzlü (Octet), Kelvin hücresi ve çoklu prizmatik (multi-prismatic) yapılar yer almaktadır (Yin ve diğerleri, 2023; Wu ve diğerleri, 2023a). Her biri kendine özgü birim hücre geometrisine sahip olan bu yapılar, yük yönüne ve hücre düzenlemesine bağlı olarak farklı mekanik tepkiler ortaya koyabilir. Şekil 2.6'da bu yapılara ait bazı örnek topolojiler görsel olarak sunulmaktadır.



Sekizli Plaka Yapı	Basit Kübik Plaka Yapı	Hacim merkezli Kübik Yapı

Şekil 2.6. Üç boyutlu plaka yapılar (Yin ve diğerleri, 2023)

Öktezik (auxetik) kafes yapılar

Geleneksel hücresel yapılardan farklı bir mekanik davranış sergileyen, özel bir kafes sınıfı olarak tanımlanır. Bu yapılar, *negatif Poisson oranına* sahiptir; yani, klasik malzemelerin aksine çekme yükü uygulandığında genişleme, basma kuvveti altında ise daralma eğilimi gösterirler. Bu alışılmadık deformasyon davranışı, yapının geometrisine bağlı olarak ortaya çıkar ve malzemenin iç yapısının özel olarak tasarlanması ile elde edilir. Geleneksel malzemelerde Poisson oranı pozitif olup, çekme altında malzeme enine yönde daralır. Ancak ökzetik yapılarda, özel geometri sayesinde yük yönüne dik doğrultuda da genişleme gerçekleşir. Bu özgün özellik, ökzetik kafesleri yüksek deformasyon, darbe ve enerji absorpsiyonu gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir. Yüksek kırılma tokluğu, mükemmel enerji soğurma kapasitesi, çentik dayanımı, darbe sonrası şekil bütünlüğünü koruma gibi avantajlar, bu yapıları özellikle savunma sanayi, kişisel koruyucu

ekipmanlar, biyomedikal implantlar ve havacılık gibi alanlarda ön plana çıkarmaktadır (Wu, Liu, Wang ve Zhang, 2023b; Xue, Jiang ve Lu, 2023). Ökzetik kafes yapılar genellikle iki boyutlu (2B) olarak tasarlanmakla birlikte, son yıllarda gelişen eklemeli imalat teknolojileri sayesinde üç boyutlu (3B) ökzetik yapılara olan ilgi de artmıştır. 3B ökzetik yapıların üretilebilmesi, bu yapılara yeni fonksiyonlar kazandırmakta ve onları farklı mühendislik uygulamaları için daha işlevsel hale getirmektedir.

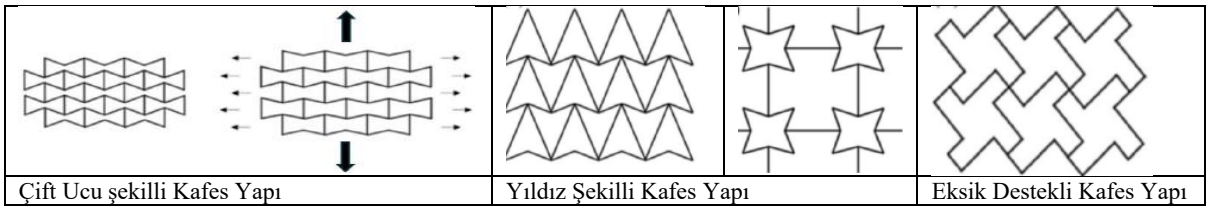
Literatürde en sık karşılaşılan ve en çok incelenmiş ökzetik yapı geometrileri arasında; *Girintili altıgen yapı (Re-entrant Hexagon):* Klasik altıgen hücrelerin içe doğru kıvrılmasıyla elde edilen bu yapı, en çok bilinen ökzetik formdur. Basit üretim geometrisine ve iyi mekanik performansa sahiptir.

Çift ok ucu şekilli yapı (Double Arrowhead): Yük altında dengeli deformasyon dağılımı gösteren bu yapı, yüksek enerji emilimi sağlar.

Yıldız şekilli yapı (Star-Shaped): Çok yönlü deformasyon kabiliyetine sahip olup, özellikle çok eksenli yüklemelerde avantaj sağlar**.**

Eksik destekli yapı (missing rib)

Hücre içindeki bazı elemanların kaldırılmasıyla elde edilen bu yapı, deformasyon kontrolünü optimize edebilir. Bu yapı türleri Şekil 2.7'de görsel olarak örneklenmiş olup, her biri belirli yükleme koşulları altında farklı performans avantajları sunmaktadır.



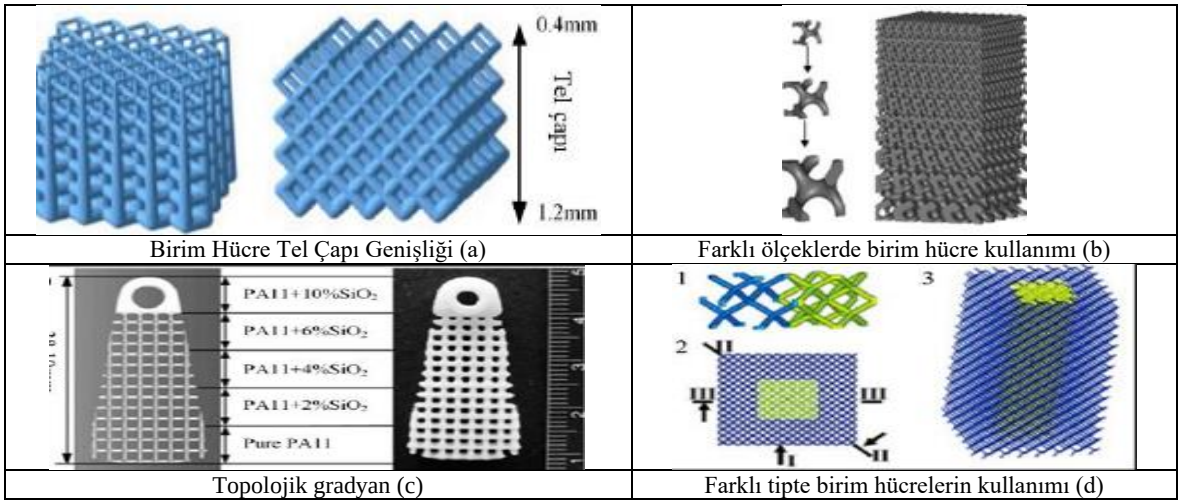
Şekil 2.7. İki boyutlu ökzetik yapılara örnek (Xue ve diğerleri, 2023)

Ökzetik yapılar, geometri-tabanlı bir mühendislik yaklaşımıyla malzemeye olağan dışı mekanik özellikler kazandırılmasına imkân tanır; bu da onları geleneksel malzemelerle sağlanamayan çözümler için önemli bir alternatif haline getirir.

Gradyan kafes yapılar

Birim hücrelerin boyutlarının, kiriş kalınlıklarının ya da levha elemanlarının ölçülerinin yapı boyunca değişiklik gösterdiği, fonksiyonel olarak özelleştirilebilen kafes sistemleridir. Bu yapılar, doğada bulunan biyolojik sistemlerin morfolojik özelliklerinden esinlenerek geliştirilmiştir. Örneğin kemik dokusunda görüldüğü gibi, yapının farklı bölgelerinde yoğunluk ve yapı geometrisi değişkenlik gösterebilir. Aynı prensip, gradyan kafes yapılarda da geçerlidir; yapı boyunca kontrollü bir şekilde değiştirilen hücre yoğunluğu ve geometrik boyutlar sayesinde, belirli bölgelerde farklı mekanik tepkiler elde etmek mümkündür (Seharing, Sridharan ve Moghaddam, 2020; Korkmaz, Aydın ve Gümrük, 2022). Gradyan kafes yapıların en temel avantajlarından biri, yük altındaki davranışlarının klasik üniform kafes yapılara göre daha kontrollü ve tahmin edilebilir olmasıdır. Bu yapılarda, nispeten daha zayıf veya düşük yoğunluklu bölgeler, yük altındaki deformasyonu ilk karşılayan kısımlar olurken; daha yoğun bölgeler, bu deformasyonu dengeleyen ve taşıyan alanlar olarak görev alır. Bu sayede, yüklerin yapıya daha dengeli dağılması sağlanır ve yapı genelinde enerji emilimi, darbe dayanımı ve kırılma direnci optimize edilir. Gradyan kafes yapılar, mekanik özelliklerin bölgesel olarak değiştirilmesini sağlayan çeşitli tasarım stratejileriyle oluşturulabilir. Literatürde dört ana gradyan yapı tasarım metodolojisi tanımlanmıştır (Bai, Gong, Chen, Sun, Xin, Pu, Peng, Luo, 2020).

Tel çağları değişkenliği (strut thickness gradient): Yapıyı oluşturan kirişlerin (strut) çapları, yapı boyunca değişken olacak şekilde tasarlanır. Bu yaklaşımda malzeme yoğunluğu belirli bir yönde artar veya azalır (Şekil 2.8a).



Birim Hücre Tel Çapı Genişliği (a) | Farklı ölçeklerde birim hücre kullanımı (b)

Topolojik gradyan (c) | Farklı tipte birim hücrelerin kullanımı (d)

Şekil 2.8. Gradyan kafes yapı (Bai ve diğerleri, 2020)

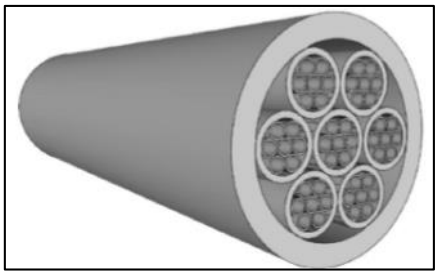
Farklı ölçeklerde birim hücre kullanımı: Yapının farklı bölgelerinde aynı tip hücre kullanılır, ancak hücre boyutları ölçeklenerek değişkenlik gösterir. Bu sayede, hassas bölgelerde küçük hücreler, taşıyıcı bölgelerde ise daha büyük hücreler kullanılabilir (Şekil 2.8b).

Farklı tipte birim hücrelerin kullanımı: Aynı yapı içerisinde farklı mekanik davranışlar sunan birim hücre türleri seçilerek kullanılır. Örneğin bir bölgede gövde merkezli kübik (BCC), başka bir bölgede oktet yapı gibi farklı hücre türleri tercih edilebilir (Şekil 2.8c). *Topolojik gradyan*: Hücrelerin topolojik özelliklerinin (bağlantı sayısı, açıklık oranı gibi) yapı boyunca aşamalı şekilde değiştirilmesiyle oluşturulan gradyan yapı tipidir. Bu yöntemle geometrik karmaşıklık ve fonksiyonel farklılık daha geniş bir kontrol altında optimize edilebilir (Şekil 2.8d). Gradyan yapılar, geleneksel yapıların sınırlı kaldığı bölgelerde yüksek fonksiyonellik sunarak, eklemeli imalatın sağladığı geometrik özgürlük ile birleştiğinde son derece verimli mühendislik çözümleri ortaya koymaktadır.

Hiyerarşik kafes yapılar

Farklı ölçeklerde yapılandırılmış birim hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok seviyeli sistemlerdir. Bu yapı tipinde küçük boyutlu birim hücreler, daha büyük ölçekli bir ana birim hücrenin kiriş ya da levha elemanlarının içine yerleştirilerek çok katmanlı bir yapısal organizasyon sağlanır. Yani, bir yapının taşıyıcı elemanları olan kiriş veya plakalar, aslında daha küçük ve detaylı kafes hücrelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu çok ölçekli yapı prensibi sayesinde, yalnızca genel yapının değil, aynı zamanda alt yapısal detayların da optimize edilmesi mümkün hâle gelir. Böylelikle hem mikro hem de makro düzeyde mekanik performans artırılabilir.

Hiyerarşik düzenleme, bu yapıların temel karakteristiklerinden biridir ve yapının kaç katmanlı (ya da kaç düzeyli) olarak tasarlandığını ifade eder. Hiyerarşi derecesi arttıkça, yapı daha karmaşık bir geometrik düzenleme kazanmakla birlikte, potansiyel olarak daha yüksek dayanım/ağırlık oranı, darbe sönümleme kabiliyeti ve enerji absorpsiyonu gibi üstün mühendislik özellikleri sunabilir. Bu yönüyle hiyerarşik kafes yapılar, hafiflik ve dayanıklılığın aynı anda sağlanmasının gerektiği pek çok uygulamada tercih edilmektedir (Şekil 2.9) (Tsang, Poon ve Ho, 2019).



Şekil 2.9. İki boyutlu hiyerarşik kafes yapı örneği (Tsang ve diğerleri, 2019)

Doğada bu tür yapıların örnekleri oldukça yaygındır. Özellikle Euplectella süngeri (cam süngeri), kemik dokusu ve kas hücresi yapıları, çok ölçekli organizasyonları ile bu prensibin biyolojik örnekleri arasında yer alır. Bu doğal yapılar, optimum yapısal verimliliğe ulaşmak için zamanla evrimleşmiş ve mühendislik tasarımına da ilham kaynağı olmuştur (Al Nashar ve Sutradhar, 2021).

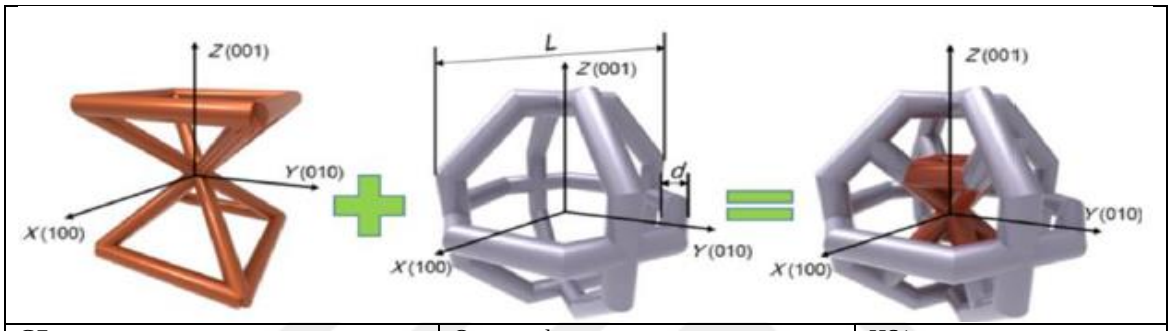
Hiyerarşik kafes yapılar hem iki boyutlu (2B) hem de üç boyutlu (3B) olarak tasarlanabilir. Üstelik bu tasarım yaklaşımı, sadece malzeme kullanımını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda mekanik performans üzerinde doğrudan etkili olur. Bu sayede, geleneksel kafes sistemlere kıyasla çok daha hafif, daha güçlü ve daha verimli yapıların üretilmesi mümkün olur. Özellikle havacılık, biyomedikal implantlar, taşıyıcı mimari yapılar ve koruyucu sistemler gibi yüksek mühendislik gerektiren alanlarda bu yapıların kullanımı giderek artmaktadır (Meza, Das ve Greer, 2015; Tsang ve diğerleri, 2019; Zheng ve diğerleri, 2016).

Hibrit kafes yapılar

Farklı yapıların avantajlı yönlerini bir araya getirerek daha fonksiyonel, daha verimli ve uygulamaya özel çözümler sunan gelişmiş bir mühendislik stratejisidir (Li, Zhang, Wang, Liu, 2023). Bu yöntem yalnızca geleneksel yapı sistemlerinde değil, aynı zamanda kafes yapılar gibi ileri düzey malzeme mimarilerinde de etkin şekilde uygulanabilmektedir. Hibrit kafes yapılar, bu bağlamda farklı birim hücre tiplerinin veya farklı malzemelerin tek bir yapıda entegre edilmesiyle oluşturulan sistemlerdir. Bu yapılar, yalnızca tek bir yapı geometrisinin sınırlı özelliklerine bağlı kalmaksızın, farklı kafes türlerinin veya malzeme özelliklerinin aynı sistemde birleştirilmesine olanak tanır.

Hibrit kafes yapılar çeşitli yöntemlerle oluşturulabilir. Bunlardan ilki, farklı mekanik özelliklere sahip birim hücrelerin, belirli bir düzende veya rastgele şekilde aynı hacim içerisinde bir araya

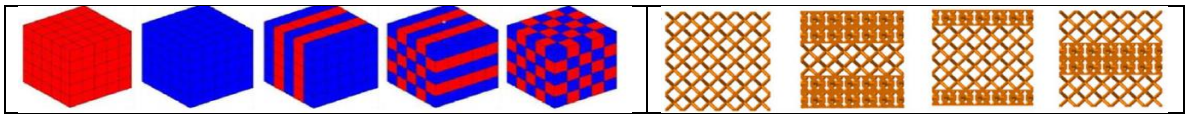
getirilmesidir. Örneğin yüksek dayanım gerektiren bölgelerde yoğun kirişli yapıların, enerji emici alanlarda ise daha esnek ya da deformasyona açık hücre tiplerinin kullanılması gibi bölgesel özelleştirme yapılabilir. Bir başka yöntem ise, farklı malzemelerin tek bir yapıda birleştirilmesidir. Bu sayede termal iletkenlik, elastisite, yoğunluk veya darbe dayanımı gibi özellikler parça içinde lokal olarak kontrol edilebilir (Li Wang, Chen ve Zhou, 2022; Yang, Zhao ve Zhang, 2023). Yapı içerisinde kullanılacak hücre türleri ya da malzemelerin seçiminde, dayanım, esneklik, enerji sönümleme, ağırlık optimizasyonu gibi faktörler dikkate alınarak tasarım yapılabilir. Şekil 2.10 ve 2.11'de hibrit kafes yapı örneklerine yer verilmiştir.



G7	Octagonal	HS1

Şekil 2.10. Hibrit birim hücre (Li ve diğerleri, 2022)

Farklı birim hücre dizilimine örnek hibrit kafes yapılar Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Farklı birim hücre dizilimine örnek hibrit kafes yapılar (Syrlybayev ve diğerleri, 2023, Yang ve diğerleri, 2023)

2.3.3. Kafes yapı parametreleri ve mekanik özellikleri

Kafes yapılar, yalnızca geometrik/topolojik özellikleriyle değil, aynı zamanda üretildikleri malzemenin karakteristikleriyle de doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bu tür yapılar hem malzeme bilimi hem de mühendislik açısından çok boyutlu bir analiz gerektirir. Literatürde uzun yıllardır bilinen geleneksel ölçekli kafes sistemlerinden farklı olarak, bu çalışmada ele alınan kafes yapılar, genellikle mikro ya da mezo ölçekte tasarlanmakta ve çoğunlukla doğrudan yapısal sistemler olarak değil, "kafes malzeme" formunda değerlendirilmektedir.

Bu durum, söz konusu yapıların işlevini, üretim yöntemlerini ve performansını doğrudan etkileyen temel bir ayrımı yansıtmaktadır.

Ashby (2006) tarafından yapılan tanımlamalara göre, bu tür küçük ölçekli kafes yapıların davranışını ve performansını etkileyen üç temel değişken bulunmaktadır. Bunlardan ilki, yapının üretildiği malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleridir. Malzemenin elastisite modülü, yoğunluğu, termal iletkenliği gibi özellikler, aynı topolojiye sahip iki kafesin davranışında bile ciddi farklar yaratabilir. İkinci önemli faktör ise, kafesi oluşturan strüktürel elemanların geometrisi (kiriş, yüzey gibi) ve bu elemanların bağlanma düzenidir. Kirişlerin uzunluğu, çapı, bağlantı noktalarının konumu gibi topolojik detaylar, yapının yük taşıma, deformasyon ve enerji soğurma gibi işlevlerini doğrudan etkiler. Üçüncü ve en kritik parametrelerden biri ise, kafes yapının bağıl yoğunluğudur. Bağıl yoğunluk değeri "Eş. 2.1"de gösterilmektedir (Ashby, 2006).

$$\rho^* = \frac{\rho\, kafes}{\rho katı} = \frac{Vs}{V} \qquad (2.1)$$

ρ * =Bağıl yoğunluk,
ρ kafes =Üretilmiş kafes yapının yoğunluğu,
ρ katı = Kafes yapının üretildiği katı malzemenin yoğunluğu,
V: kafes hacmi,
V_s: katı malzeme hacmi.

Bağıl yoğunluk (relatif yoğunluk), bir kafes yapının toplam yoğunluğunun, aynı hacimdeki tam dolu (katı) bir malzemenin yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Teknik olarak ifade etmek gerekirse, bağıl yoğunluk "ρ *", kullanılan malzeme hacminin, toplam yapı hacmine oranı olarak da tanımlanabilir. Bu değer, kafes yapının mekanik dayanım, deformasyon davranışı ve enerji absorpsiyon kapasitesi gibi özellikleri üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Düşük bağıl yoğunluğa sahip yapılar, genellikle daha hafif olmalarına rağmen, belirli koşullar altında yüksek enerji soğurma kapasitesi gösterebilirken; yüksek bağıl yoğunluk, daha rijit ama genellikle daha ağır yapıların elde edilmesini sağlar. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında istenen performansa göre bağıl yoğunluk dikkatle optimize edilmelidir.

Kafes yapılar, uygulanan yükler altında ortaya çıkan iç kuvvetlerin türüne göre genellikle iki ana sınıfa ayrılır: Eğilme baskın (bending-dominated) ve gerinme baskın (stretching-dominated) yapılar. Bu sınıflandırma, kafes yapıların mekanik dayanımı, deformasyon

davranışları ve hata oluşum mekanizmalarının önceden tahmin edilebilmesini sağlar. Eğilme baskın yapılar, yük altında daha fazla yer değiştirme gösterirken; gerinme baskın yapılar daha rijit davranır ve daha yüksek mekanik performans sergiler. Bu sınıflandırmanın temel dayanaklarından biri, Maxwell kararlılık kriteridir. Maxwell kararlılık kriteri, bir kafes yapının statik olarak kararlı mı yoksa aşırı derecede bağsız mı olduğunu belirlemek için kullanılır. Maxwell'in klasik kararlılık ifadesi, bir kafes sistemdeki eleman ve bağlantı sayılarına göre iki boyutlu ve üç boyutlu kafes yapılar için "Eş. 2.2 ve Eş. 2.3"de verilmiştir.

İki boyutlu kiriş temelli kafes yapılar: $M= b-2j\cdot+3$ (2.2)

Üç boyutlu kiriş temelli kafes yapılar: $M = b -3 j +6$ (2.3)

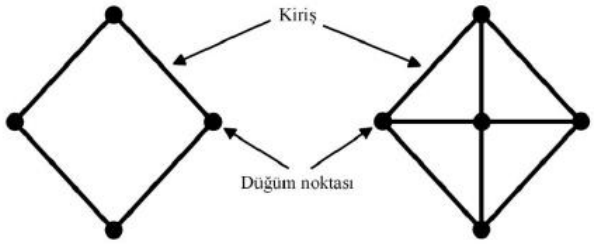
Burada: M: Kafesin statik kararlılık derecesi,

b: Kiriş (çubuk) sayısı,
j: Düğüm noktası sayısıdır.

Bir yapı için: M<0: Statik olarak kararsız (mekanik olarak aşırı bağsız) eğilme baskın davranış;

M=0: Sınırda kararlı ve M>0: Statik olarak aşırı bağlanmış ve yüksek rijitliktedir, uzama baskın davranış (Leary, 2020).

Bu kriter doğrultusunda, gerinme (stretching-dominated) baskın yapılar genellikle statik olarak belirli ve rijit, eğilme (bending-dominated) baskın yapılar ise daha esnek ve daha az bağlanmış olarak tanımlanır (Şekil 2.12).



Kiriş Sayısı: b=4 Düğüm sayısı: j=4 Maxvell Kriteri: M=-1<0	Kiriş Sayısı: b=8 Düğüm sayısı: j=5 Maxvell Kriteri: M=1>0

Şekil 2.12. Eğilme baskın yapı örneği ve gerinme baskın yapı örneği (Yaşar, Ayas, Durmuş ve Çavdar, 2025)

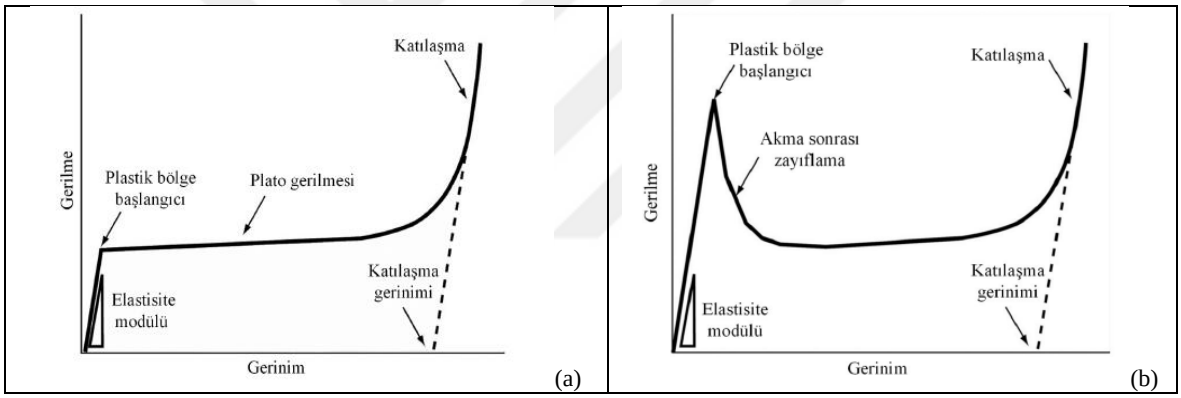
Bu yapısal ayrım, özellikle kiriş temelli kafes yapılarda belirgin şekilde görülür. Eğilme baskın yapılarda yükler, daha çok kirişlerin moment almasına neden olur; bu da yapının elastik enerji biriktirmesine ve büyük deformasyonlara yol açar. Buna karşılık, gerinme baskın yapılarda yükler doğrudan eksenel olarak iletilir, bu sayede daha verimli bir taşıma ve deformasyon kontrolü sağlanır.

Kafes yapıların mekanik davranışları, büyük ölçüde dış yükleme tipi ile yapının geometrik tasarımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda kafes yapılar, taşıyıcı elemanların maruz kaldığı iç kuvvet türüne göre genel olarak iki grupta incelenebilir: Eğilme baskın (bending-dominated) ve gerinme baskın (stretching-dominated) yapılar. Eğilme baskın yapılarda, yapısal elemanlar genellikle eksenel yükleri doğrudan taşımak yerine eğilme momentlerine maruz kalmaktadır. Bu durum, yapı içerisinde yüksek deformasyonlara neden olur ve yapı bir nevi mekanizma gibi davranır. Böyle yapılar, düşük bağıl yoğunluklarda daha hafif olsalar da genellikle rijitlikleri sınırlı olup elemanların birbirine göre dönmesine izin veren bağlantı noktalarının çok sayıda olmasıdır (Ashby, 2006; Leary, 2020). Gerinme baskın yapılar, kafes elemanlarının doğrudan çekme veya basma kuvvetlerini taşıyacak şekilde tasarlandığı, daha rijit ve yük taşıma kapasitesi yüksek yapılardır. Bu tür yapılarda, dış yükler, elemanlar arasında doğrudan iletilir ve eğilme momentleri minimum düzeyde tutulur. Bu sayede enerji soğurma kapasitesi yüksek, deformasyonu daha öngörülebilir ve yapısal başarısızlık riski daha düşük bir sistem elde edilir.

Eğilme ve gerinme yapı tipinin yük altında gösterdiği tipik gerilim-gerinim davranışları da farklılık göstermektedir. Eğilme baskın yapılarda, yapı elastik sınırın ötesine geçtikten sonra, malzeme akma gerilmesini aştığında yapının davranışı doğrusal olmayan bir hal alır. Bu aşamada, yapıyı oluşturan elemanlar dış kuvvet etkisiyle eğilmeye devam eder ve elemanlar birbirine temas etmeye başladıkça ezilme bölgesi meydana gelir. Bu bölgede gerilme değerleri önemli ölçüde sabit kalır. Yapının daha fazla yük taşıyamayacak hale geldiği noktada, elemanların birbirine teması sıklaştığı için gerilme yeniden artmaya başlar; bu son evre katılaşma bölgesi olarak adlandırılır.

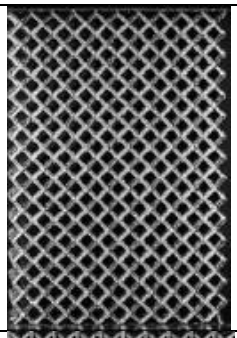
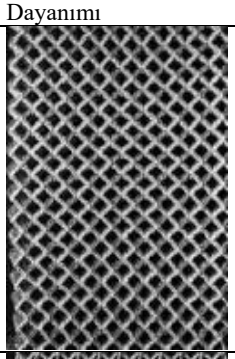
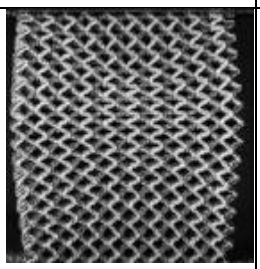
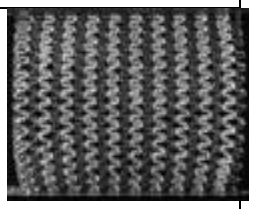
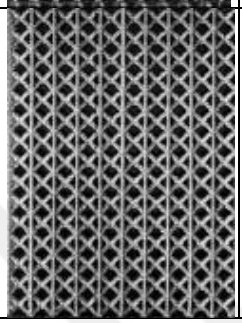
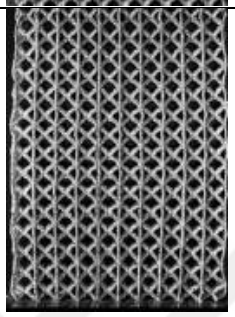
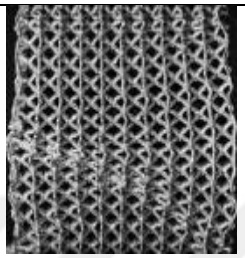
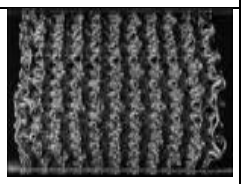
Gerinme baskın yapılarda ise gerilim-gerinim eğrisi genellikle daha keskin bir karakteristik sergiler. Gerinme baskın bir kafes yapıda ise kuvvetin etkisiyle, yapıyı oluşturan elemanlar çeki-bası yüklerine maruz kalırlar. Bu tip yapılarda elastik bölge aşılana kadar gerilme

değerleri artar ve en yüksek noktasına ulaşır. Sonrasında gerilme hızlı bir şekilde düşmeye başlar, bu bölgede lineer olmayan davranış görülür ve yük kaldırılırsa yapı deformasyona uğramış şekilde kalır. Basma yükü etkimeye devam edilirse, gerilme değerlerinin değişim hızı düşer ve yapı ezilmeye devam eder. Eğilme baskın yapılarda olduğu gibi kafes yapıyı oluşturan elemanların birbirine temas etmesinden dolayı ezilmenin yavaşladığı bölgede katılaşma denilen bölge başlar ve gerilme değerleri çok hızlı bir şekilde artış gösterir Elastik bölge sonuna kadar gerilme değeri hızlı bir şekilde artar ve yapı yüksek dayanım gösterir. Elastik sınır aşıldığında ise yapının davranışı doğrusal olmayan hale gelir ve plastik deformasyon başlar. Bu aşamada yapı kalıcı deformasyona uğrar ve yük kaldırıldığında eski formuna geri dönemez. Yük uygulanmaya devam ettiğinde, yapı ezilmeye başlar. Eğilme baskın yapılarda olduğu gibi, gerinme baskın yapılarda da elemanlar arasında temas başladığında katılaşma süreci devreye girer ve gerilme değerleri hızla yükselir (Şekil 2.13).



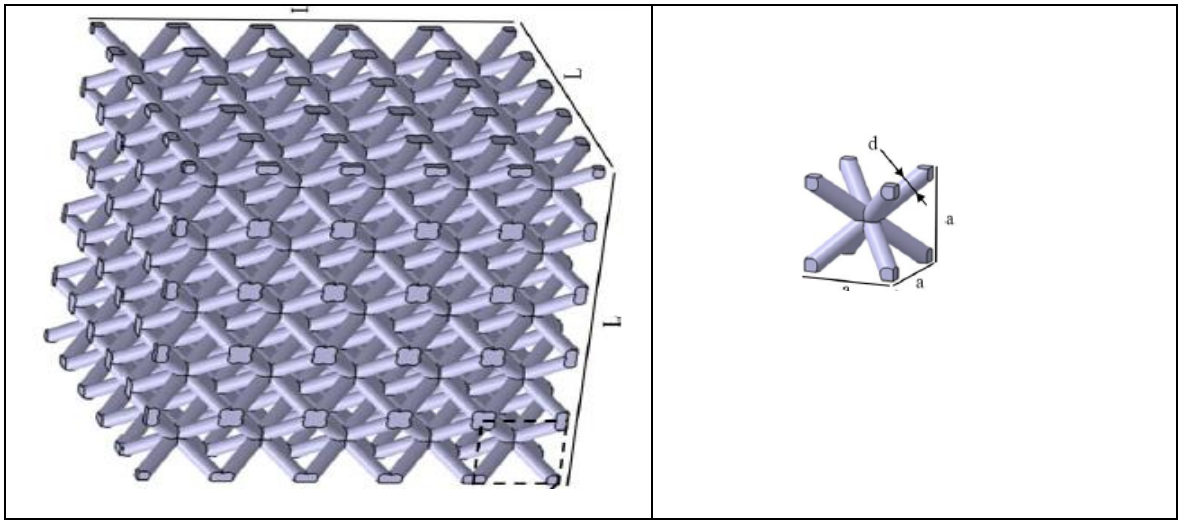
Şekil 2.13. (a) Eğilme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (b) Gerinme baskın yapı karakteristik gerilme-gerinim eğrisi (Ashby, 2006)

Her iki yapı tipi de kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Eğilme baskın yapılar daha hafif ve daha az malzeme kullanılarak üretilebilirken, gerinme baskın yapılar daha yüksek taşıma kapasitesine sahiptir ve kritik mühendislik uygulamaları için daha güvenli bir seçenek sunmaktadır. Bu nedenle, yapıların hangi amaçla ve hangi yükleme koşulları altında kullanılacağına bağlı olarak uygun topolojik yapı tercih edilmelidir. Şekil 2.14'te eğilme baskın kafes yapısı ve gerinme baskın kafes yapısı verilmiştir.

	Yüksüz Durum	En Yüksek Basma Dayanımı	Ezilme Bölgesi	Katılaşma Bölgesi
Eğilme Baskın				
Gerinme Baskın				

Şekil 2.14. Eğilme ve gerinme baskın yapı karakteristik hasar ilerlemesi (Leary, 2020)

Gövde Merkezli Kübik (GMK) yapı, kafes malzemeler arasında en yaygın kullanılan birim hücre türlerinden biridir. Bu yapılar, kafes geometrisinin temelini oluşturan düzenli ve tekrarlayan birim hücrelerin, belirli bir hacim boyunca üç boyutta yerleştirilmesiyle meydana gelir. Şekil 2.15'te gösterilen örnek yapı, 5×5×5 konfigürasyonunda yani üç boyutta toplam 125 birim hücrenin birleşiminden oluşmaktadır (Yaşar ve diğerleri, 2025).



Şekil 2.15. 5x5x5 konfigürasyonunda gövde merkezli kübik kafes yapı (Yaşar ve diğerleri, 2025)

Gövde Merkezli Kübik yapının birim hücresinde, “a” harfi ile gösterilen uzunluk, her bir birim hücrenin dıştan dışa kenar uzunluğunu ifade ederken; “L” ile belirtilen değer, tüm kafes yapının kübik formda dıştan dışa toplam kenar uzunluğunu temsil eder. Birim hücre içinde yer alan ve birbirine bağlanan kirişlerin çapı ise “d” ile gösterilir. Yapının kübik formda olması nedeniyle tüm kenar uzunlukları birbirine eşit olarak kabul edilir ve üniform (tek tip) kafes tasarımı özelliği taşır; bu da yapının tüm noktalarında aynı mekanik davranışı göstermesini sağlar. Birim hücre boyutlarında, kafesin dış boyutlarında veya kiriş kesitlerinde çeşitli değişiklikler yapılabilir. Örneğin, kiriş çapı farklılaştırılarak yapının rijitliği artırılabilir ya da birim hücre boyutu küçültülerek daha yoğun bir yapı elde edilebilir. Bu tür geometrik varyasyonlar, kafes yapının mekanik performansını önemli ölçüde etkileyebilir ve özellikle gradyan yapılar, çok malzemeli kafesler veya hibrit tasarımlar gibi daha gelişmiş yapısal uygulamalarda önemli rol oynamaktadır (Yaşar ve diğerleri, 2025).

2.3.4. Kafes yapıların enerji soğurumu

Kafes yapıların mühendislik uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilmesinin nedenlerinden biri, özellikle darbe ve çarpışma gibi ani yükleme durumlarında etkili enerji soğurma özelliklerine sahip olmalarıdır. Bu özellik, yapının deformasyon süreci boyunca uygulanan kuvvet ile oluşan ezilme miktarı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bir kuvvet-deformasyon (kuvvet-basma) eğrisi örnek alınırsa yapı üzerine uygulanan basma kuvveti ile elde edilen ezilme (deformasyon) arasındaki ilişki, eğri altında kalan alan olarak ifade edilen toplam enerji soğurma kapasitesi (tokluk) ile temsil edilir.

Toplam Soğurulan Enerji (TSE), yapı üzerine uygulanan kuvvetin deformasyon boyunca yaptığı işe karşılık gelir. Matematiksel olarak, bu değer “Eş. 2.4” de ifade edilmiştir.

$$\text{TSE}= \int_0^{d_{maks}} F(x)dx \qquad (2.4)$$

x: ezilme miktarı,

F(x): deformasyonun (x) herhangi bir anında uygulanan kuvvet,

d_{maks}: katılaşma bölgesinin başladığı, yapının tamamen ezilip kirişlerin birbirine temas etmeye başladığı deformansyon miktarını belirtir.

Enerji soğurma davranışının yapının kütlesi ile normalize edilerek değerlendirilmesi ise *Özgül Soğurulan Enerji* (ÖSE) kavramı ile gerçekleştirilir (Eş. 2.5).

$$\text{ÖSE}=\frac{\int_0^{d_{maks}} F(x)dx}{m} = \frac{\text{TSE}}{m} \tag{2.5}$$

Eşitlik 2.5'te;

m: kafes yapının toplam kütlesi,
TSE: Toplam soğurulan enerjiyi göstermektedir.

ÖSE değeri, özellikle hafif ve yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda, yapıların performansını değerlendirmede oldukça önemli bir parametredir. Kafes yapıların geometrik parametrelerinin (örneğin; birim hücre tipi, kiriş kalınlığı, bağıl yoğunluk gibi) değiştirilmesi ile hem TSE hem de ÖSE değerlerinde önemli farklılıklar gözlemlenebilir. Bu bağlamda, farklı yapı tiplerinin yük altındaki davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir ve bu analizler yapısal tasarım süreçlerine doğrudan katkı sağlar.

2.4. Çimento Esaslı Harç

Gyroid ve diğer hücresel kafes yapılarla birlikte kullanılacak harç türünün seçimi, kompozit sistemin nihai mekanik performansı açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalarda (Nguyen, Suhaizan ve Nguyen-Xuan 2023; Salazar, Williams, Aghdasi, Ostertag ve Taylor, 2018; Tang, Liu, Hao ve Wei, 2023), farklı tipte beton karışımları kullanılarak kafes-beton etkileşiminin süneklik, tokluk ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda harcın seçimini etkileyen ana faktörler aşağıda özetlenmiştir:

2.4.1. Dayanım sınıfı ve mekanik özellikler

Gyroid veya sekizli kafes yapıların içine yerleştirileceği harcın, kafesin oluşturduğu boşlukları doldururken yük transferini verimli şekilde sağlaması gerekir. Yüksek dayanımlı harç, yüksek basınç dayanımı ve düşük gözeneklilikleri nedeniyle literatürde sıkça tercih edilmiştir (Salazar, Aghdasi, Williams, Ostertag ve Taylor, 2020). Bu harçlar, kafes yapının sunduğu süneklik katkısı ile birleşerek daha dengeli bir mekanik davranış sağlamaktadır.

Ancak yüksek dayanımlı harcın kırılganlığı, kullanılan kafes yapıların "tokluk artırıcı" etkisiyle dengelenmektedir.

2.4.2. Çalışılabilirlik ve akışkanlık

Kafes yapıların karmaşık geometrileri, harcın bu boşlukları doldurmasını zorlaştırabilir. Bu nedenle, kendiliğinden yerleşen harçlar (Self-Consolidating Concrete – SCC**)** ve yüksek akışkanlık sağlayan karışımlar tercih edilmiştir (Tang ve diğerleri, 2023). Özellikle dar hücre boyutlu kafeslerde, çökmeyen ama akıcı betonlar, hava boşluklarını en aza indirerek kafes–beton bütünleşmesini arttırmaktadır.

2.4.3. Lif takviyesi ile kombinasyon

Bazı araştırmalar (Salazar ve diğerleri, 2018; Qin, Cao, Yılmaz ve Li, 2021), PVA, çelik veya polipropilen lif takviyeli harçlar ile kafes yapıların birlikte kullanımını incelemiştir. Bulgular, lif takviyesinin kafes yapılarla birlikte kullanıldığında tokluğu daha da artırdığını, çatlak yayılımını engellediğini göstermektedir. Ancak, lif ve kafes takviyesinin birlikte kullanımı, betonun işlenebilirliğini zorlaştırabilir ve doğru dozajlama ihtiyacı doğurur.

2.4.4. Agrega boyutu ve granülometri

Gyroid ve benzeri kafes yapılarda, kafesin hücre açıklıkları harcın geçişine izin verecek şekilde tasarlanmalıdır. Büyük agregalı harçlar, küçük hücre açıklıklarında tıkanmalara ve boşluk oluşumuna yol açabilir. Bu nedenle, literatürde çoğunlukla ince agrega oranı yüksek, maksimum tane boyutu düşürülmüş harç karışımları kullanılmıştır (Nguyen ve diğerleri, 2023). Böylece kafesin iç hacmi tam olarak doldurulabilmiş ve yapısal bütünlük sağlanmıştır.

2.4.5. Kürleme koşulları ve dayanıklılık

Harç seçimi yalnızca karışım tasarımı ile sınırlı değildir. Kürleme yöntemi ve süresi de kafes-beton kompozitinin performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle PLA gibi biyobozunur kafes malzemeleri ile çalışıldığında, yüksek sıcaklıklı buhar kürleri malzemeye zarar verebilir (Chen Chen, Xuan, Zhang ve Zhang, 2023). Bu nedenle çoğu çalışmada normal sıcaklıkta su kürlemesi tercih edilmiştir. Kafes yapılarda kullanılacak harç için malzeme seçim kriterleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Gyroid ve kafes yapılarda kullanılacak harç için malzeme seçim kriterleri

Kriter	Açıklama	Literatür Desteği
Dayanım Sınıfı	Gyroid yapıların sağladığı süneklik katkısı ile dengelenecek şekilde yüksek dayanımlı beton (UHPC veya C50 ve üzeri) tercih edilmelidir.	Salazar ve diğerleri, (2020); Nguyen ve diğerleri (2023)
Çalışılabilirlik /Akışkanlık	Kafes iç boşluklarını doldurmak için kendiliğinden yerleşen (SCC) veya yüksek akışkanlıkta beton kullanılmalı; vibrasyon ihtiyacı minimum olmalıdır.	Tang ve diğerleri (2023); Qin ve diğerleri (2021)
Lif Takviyesi	PVA, polipropilen veya çelik lif kullanımı, çatlak kontrolü ve tokluk arttırımı için önerilir; kafes yapının işlevini destekler.	Salazar ve diğerleri (2018); Liu, Kanwal, Tang ve Hao (2022)
Agrega Boyutu	Kafes geometrisi nedeniyle maksimum tane boyutu 8–10 mm'yi aşmamalıdır; ince agrega oranı yüksek karışımlar tercih edilmelidir.	Nguyen ve diğerleri (2023); Song ve diğerleri (2021)
Bağlayıcı Tipi	Portland çimentosu (CEM I) veya yüksek reaktif puzzolanik katkılı UHPC tercih edilebilir; düşük büzülme ve yüksek dayanıklılık sağlanır.	Abueidda ve diğerleri (2019); Peng ve Tran (2020)
Katkı Maddeleri	Akışkanlaştırıcı/süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanımı kafes içi boşlukların eksiksiz doldurulması için önemlidir.	Xu, Zhang, Gan ve Savija (2021); Zhu ve diğerleri (2021)
Kürleme Yöntemi	PLA/ABS gibi biyobozunur kafes malzemeleri ile çalışıldığında normal sıcaklıkta su kürlemesi tercih edilmelidir; yüksek sıcaklık kürleri malzemeye zarar verebilir.	Chen ve diğerleri (2023); Higuera, Miralbes ve Ranz (2021)
Dayanıklılık Kriterleri	Donma-çözülme, sülfat ve klorür dayanımı dikkate alınmalı; kafes yapının uzun ömürlü performansı için düşük su/çimento oranı tercih edilmelidir.	Chen ve diğerleri (2023); Skoratko, Szatkiewicz, Katzer ve Jagoda, (2022)

Bu tezde kullanılacak kafes yapılar**,** dayanım–süneklik dengesini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, akışkanlığı iyi, ince agrega oranı yüksek bir harç seçimi hedeflenmiştir. Ayrıca, kafesin malzeme özelliklerine zarar vermeyecek uygun kürleme koşulları da dikkate alınmıştır. Literatür, bu yaklaşımın hem yük taşıma kapasitesini artırdığını hem de çatlak ilerleme davranışını kontrol altına aldığını göstermektedir.

2.5. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar**;** "Doğadaki Gyroid Yapılar ve Biyomimetik Yaklaşımlar", "Polimer Tabanlı Gyroid Yapılar ve Beton Takviyesi Çalışmaları" ve "Metal Tabanlı Gyroid Yapılar ve Biyomedikal Uygulamalar" olmak üzere üç ana başlık altında incelenmiştir.

2.5.1. Doğadaki gyroid yapılar ve biyomimetik yaklaşımlar ile ilgili çalışmalar

Suzuki, Seki ve Matsushita (2000), çalışmalarında, ABC triblok kopolimerlerin yapısal özelliklerini incelemeye odaklanmışlardır. Araştırmanın temel amacı, bu kompleks polimerlerin moleküler düzeyde nasıl organize olduğunu anlamak ve elde edilen bulguları hem teorik hem de deneysel olarak doğrulamaktır. Bu kapsamda, öncelikle polimerin olası yapısal düzenini öngörmek amacıyla ayrıntılı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Oluşturulan bu teorik modeller, polimer zincirlerinin kendiliğinden nasıl organize olabileceğine dair çeşitli senaryolar sunmuş ve bu sayede olası faz morfolojileri

belirlenmiştir. Araştırma ekibi, geliştirdikleri modellerin doğruluğunu test etmek amacıyla sentezledikleri ABC triblok kopolimer numunelerini üretmiş ve bu numuneleri ileri karakterizasyon teknikleriyle incelemiştir. Özellikle elektron mikroskobu (TEM – Transmission Electron Microscopy) görüntüleri, teorik modellerle karşılaştırılarak elde edilen verilerin gerçek malzeme morfolojisini ne ölçüde yansıttığı analiz edilmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda, teorik olarak formüle edilen modelin, üretilen kopolimerin gerçek yapısını başarıyla tanımladığı kanıtlanmıştır. Bulgular, sentezlenen kopolimerin, literatürde "trisürekli çift gyroid yapı" olarak tanımlanan karmaşık bir morfolojiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Bu yapı, üç farklı polimer fazının periyodik olarak düzenlenmesiyle ortaya çıkan ve her fazın sürekli bir ağ oluşturduğu son derece sofistike bir mikro yapı niteliğindedir. Suzuki ve diğerlerinin çalışması, yalnızca belirli bir kopolimerin yapısal özelliklerini açıklamakla kalmamış, aynı zamanda teorik modellemenin polimer biliminde karmaşık morfolojileri anlamada ne kadar güçlü bir araç olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonucunda tanımlanan trisürekli çift gyroid yapısı, malzeme bilimi açısından büyük önem taşımakta olup, kontrollü morfolojiye sahip yeni nesil fonksiyonel polimerlerin tasarımı ve üretimi için bir temel oluşturmaktadır.

Mille, Tyrode ve Corkery (2011), belirli dalga boylarındaki ışığın yayılımını engelleyen ve yönlendiren fotonik yapılara yönelik araştırmalarında, doğal organizmalarda bulunan organik yapıları incelemişlerdir. Çalışmada özellikle, belirli renklerin oluşum mekanizmalarını anlamak amacıyla uygun bir kelebek türü seçilmiş ve bu kelebeğin kanatlarındaki renk yansımaları ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırmanın temel odak noktası, kanat yüzeyinde gözlemlenen yeşil rengin, pigment kaynaklı mı yoksa yapısal renklenme mekanizmasıyla mı oluştuğunun tespit edilmesidir. İnceleme sonucunda, her yönden gelen ışığın, kanat yüzeyinde homojen bir şekilde dağılarak yeşil renk algısını oluşturduğu belirlenmiştir. Bu fenomenin, kanat yapısında bulunan üç boyutlu periyodik minimal yüzeylerden (TPMS) biri olan gyroid yapıdan kaynaklandığı öngörülmüştür. Mille ve ekibi, gyroid yapısının eşsiz geometrik özellikleri sayesinde, kanat yüzeyinde dört farklı rengin – mozaik benzeri bir dağılımla – farklı gözeneklerde yer aldığını, bu renklerin bir araya gelmesiyle de algılanan saf yeşil rengin ortaya çıktığını kanıtlamışlardır. Çalışmanın önemli bulgularından biri, gyroid yapısının ışık yönünden bağımsız olarak (izotropik biçimde) ışığı yaymasıdır. Bu özellik, kelebeğin kanatlarındaki yeşil rengin her açıdan aynı şekilde görülebilmesini sağlamaktadır. Araştırmacılar, bu yapıyı yalnızca gözlemlemekle kalmamış, aynı zamanda laboratuvar koşullarında gyroid mimarisini taklit ederek benzer bir

yapı üretmeyi başarmışlardır. Yapay olarak üretilen numuneler, spektroskopik testlere tabi tutulmuş ve kelebek kanatlarında gözlemlenen yapısal renklenmeyle benzer spektral tepkiler sergilemiştir. Bu durum, doğadaki gyroid yapısının optik özelliklerinin başarılı şekilde yeniden üretildiğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, Mille ve diğerlerinin bu çalışması, gyroid yapıların yalnızca biyolojik yapılarda renk üretimi ve ışık yönetimi mekanizmalarında değil, aynı zamanda biyomimetik tasarım ve fotonik malzemeler geliştirme alanlarında da büyük potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür doğal yapıların mühendislik ölçütleriyle yeniden üretilebilmesi, gelecekte optik filtreler, sensörler ve renk değiştiren akıllı yüzeyler gibi yenilikçi uygulamalara kapı aralamaktadır.

Saba, Wilts, Hielscher ve Schröder-Turk (2014), kelebek kanatlarındaki gyroid yapısının biyolojik ve optik özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmada özellikle yeşil kanatlı kelebek (örneğin *Papilio* türleri) üzerinde odaklanılarak, bu türde gözlemlenen gyroid yapısının gelişim süreçleri ve morfolojik özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı, gyroid yapısının kanat gelişimindeki rolünü anlamak ve benzer morfolojilere sahip diğer böcek türlerinde bu yapının oluşum mekanizmalarını araştırmaktır. Araştırmada, seçilen böcek türlerinde bulunan diamond yapısının gyroid yapıya benzer optik yansıtma özellikleri sergilediği gözlemlenmiştir. Her iki yapının üç boyutlu periyodik minimal yüzeyler (TPMS) grubuna dahil olmaları nedeniyle, ışık yansıtma ve kırılma davranışlarında bazı benzerlikler bulunmuştur. Ancak, deneysel veriler, gyroid yapısının yansıtma özelliklerinin beklenenin aksine farklı ve karmaşık bir şekilde davrandığını ortaya koymuştur. Bu durum, gyroid yapısının optik performansının, sadece geometrik düzenlemeden değil, aynı zamanda nanoyapısal ve biyokimyasal faktörlerden de etkilendiğine işaret etmektedir. Saba ve diğerleri elde ettikleri bu sonuçlar ışığında, gyroid yapısının mekanizmalarının tam olarak anlaşılması için daha kapsamlı araştırmaların gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle farklı böcek türlerinde benzer yapısal motiflerin varlığı ve işlevselliğinin incelenmesi, biyomimetik malzeme tasarımı ve optik cihazların geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, bu tür biyolojik yapıların ışık yönetimi ve renk üretimi üzerine etkilerinin daha iyi anlaşılması, gelecek çalışmalara ışık tutacaktır. Sonuç olarak, çalışma, kelebek kanatlarındaki gyroid yapıların karmaşık optik davranışlarını ve biyolojik gelişim süreçlerini ortaya koyarak, doğal yapılarla mühendislik uygulamaları arasında köprü kurulmasına katkıda bulunmuştur. Bu da biyomimetik tasarım alanında gyroid yapıların potansiyelini desteklemektedir.

2.5.2. Polimer tabanlı gyroid yapılar ve beton takviyesi ile ilgili çalışmalar

Salazar ve diğerleri (2018), hazırladıkları oktet kafes modellemesi kapsamında, FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisi kullanarak farklı hacimsel oranlarda PLA (Polilaktik Asit) bazlı kafes kirişler üretmişlerdir. Araştırmanın temel amacı, söz konusu kafes yapıların betonun mekanik performansı üzerindeki etkilerini, özellikle süneklik, tokluk ve yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirmektir. Çalışmada, üretilen farklı hacimsel oranlara sahip kafes yapılar, PVA (Polivinil Alkol) lif içeren beton ve kontrol betonu ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sürecin merkezinde dört noktalı eğilme testi yer almakta olup, bu testler numunelerin esneklik modülü, maksimum yük kapasitesi ve enerji emme kabiliyetleri üzerinde odaklanmıştır. Test sonuçları, hacimsel oranın artışının betonun süneklik davranışını anlamlı şekilde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Örneğin, %2,88 hacimce PVA lif içeren beton numunesi ile %30 oranında kafes yapısı içeren beton numunesinin, tokluk değerleri ve maksimum yük tepe noktaları açısından oldukça benzer performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, polimerik kafes yapıların lif takviyesi ile benzer işlevsel iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermektedir. Kafes yapılarının mekanik davranışı, geleneksel beton numunelerinden farklı olarak, doğrusal olmayan ve değişken dokusal bir yük-şekil değiştirme eğrisi sergilemiştir. Bu, kafesin iç mimarisindeki hücresel geometrinin yükün dağılımını etkilediğini ve deformasyonun belirli bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. %28 civarında hacim oranına sahip kafes yapılar, kontrol beton numunesine göre yaklaşık 1,4 kat daha yüksek tepe yükü taşıyarak dayanım artışını açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, kafes yapısının betonun çatlama ve kırılma davranışlarını geciktirdiği ve yük altında daha kontrollü bir deformasyon sağladığı belirtilmiştir. Çalışmada, kafes yapısının betonun sünekliğini artırmasının temel nedenlerinden biri olarak, kafes hücrelerinin enerji emilimini artırması ve çatlak yayılmasını geciktirmesi gösterilmiştir. Polimerik kafes yapılar, beton matrisi içerisinde bir iskelet görevi görerek mikro çatlakların büyümesini engellemiş ve böylece yapının genel dayanıklılığını artırmıştır. Ayrıca, farklı hacimsel oranlarda kafes tasarımının optimize edilmesinin, betonun yapısal performansını hedeflenen uygulamalara göre ayarlamaya imkân tanıdığı vurgulanmıştır. Sonuç olarak, Salazar ve diğerlerinin çalışması, FDM ile üretilen polimerik oktet kafes yapıların, beton takviyesinde liflere alternatif veya tamamlayıcı bir çözüm sunabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, hafiflik, tasarım esnekliği ve mekanik performans açısından avantajlar sağlamakta olup, ileri kompozit malzeme tasarımına yönelik yeni araştırmalar için önemli bir temel

teşkil etmektedir. Ayrıca, bu teknolojinin sürdürülebilir malzeme kullanımı ve üretim kolaylığı açısından yapı mühendisliği alanında uygulanabilirliği yüksek potansiyele sahiptir.

Li, Liao, Dai ve Xie (2019), gyroid kafes yapıların mekanik özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada hem tek yüzeyli hem de çift yüzeyli gyroid kafes yapıları tasarlanarak, bu yapılar SLA (Stereolithography) teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Tasarım aşamasında, kafeslerin farklı bağıl yoğunluklara sahip olmaları ve anizotropik davranışlarının etkileri dikkate alınmıştır. Araştırmada, alttan yukarıya doğru bağıl yoğunluğun değiştirildiği iki farklı kafes yapı tasarımı geliştirilmiş ve bunlar, sabit yoğunluktaki referans numunelerle karşılaştırılmıştır. Mekanik testler kapsamında, numunelerin basınç dayanımları ile şekil değiştirme davranışları ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Test sonuçları göstermiştir ki, yoğunluk dağılımı heterojen olan yani eş olmayan yapılar, basınç altında katman katman çökmeye benzer bir deformasyon mekanizması sergilemektedir. Bu katmanlı çökme davranışı, yapının enerji emilimi ve deformasyon kontrolü açısından önemli bir özellik olarak değerlendirilmiştir. Özellikle levha formundaki gyroid yapılar, diğer yapısal modellerle kıyaslandığında daha yüksek enerji emilimi kapasitesi göstermiştir. Bu durum, levha gyroid kafeslerin yapısal dayanıklılığının ve darbeye karşı direncinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, levha gyroid numune grubunun davranışı, kullanılan hesaplama ilkeleri ve analitik modelleme sonuçları ile uyumlu şekilde katmanlı çökmeyi doğrulamıştır. Bu da hem deneysel hem de teorik açıdan modelin güvenilirliğini pekiştirmektedir. Bu bulgular, gyroid kafes yapıların mekanik performansının, tasarım parametreleri ve bağıl yoğunluk dağılımı ile yakından ilişkili olduğunu göstermekte ve yapısal optimizasyon çalışmalarında bu parametrelerin etkin bir şekilde kullanılması gerektiğine işaret etmektedir. Özellikle, enerji emiliminin kritik olduğu uygulamalarda, levha gyroid yapılarının tercih edilmesinin yapısal performansı arttıracağı değerlendirilmektedir.

Abueidda ve diğerleri (2019) sinterlenmiş toz teknolojisi kullanarak üç boyutlu gyroid kafes yapılar üretmişlerdir. Üretim sürecinde, poliamid 12 bazlı PA2200 filament tercih edilmiştir. Bu malzemenin seçimi, yüksek mekanik dayanımı ve işlem kolaylığı nedeniyle araştırmanın temelini oluşturmuştur. Çalışmada, farklı bağıl yoğunluk değerlerine sahip gyroid yapılar üretilerek, bağıl yoğunluğun mekanik performans üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel testlerin yanı sıra, sonlu elemanlar (FE) analizi kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlulukları

araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, bağıl yoğunluğun artmasıyla birlikte kafes yapıların mekanik dayanımları da artmaktadır. Bu doğrultuda, FE analizlerinin deneysel sonuçlarla yüksek derecede benzerlik gösterdiği ve yapısal davranışların güvenilir şekilde öngörülebildiği tespit edilmiştir. Araştırma ayrıca, önceki çalışmalarıyla karşılaştırmalı bir değerlendirme yaparak dört farklı kafes modelinin performansını ortaya koymuştur. Bu karşılaştırma neticesinde, gyroid çift katmanlı yapısının, diğer modellerden mekanik performans ve enerji emilimi açısından belirgin bir şekilde ayrıldığı vurgulanmıştır. Bu bulgu, gyroid yapısının TPMS (Triple Periodic Minimal Surfaces – Üçlü Periyodik Minimal Yüzeyler) ailesine ait olduğunun mekanik performans açısından da doğrulanması anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, Abueidda ve diğerlerinin çalışması, sinterlenmiş toz teknolojisi ile üretilen gyroid yapıların mekanik açıdan üstünlüklerini ve tasarım parametrelerinin performansa etkisini ortaya koymaktadır. Bu da TPMS tabanlı kafes yapıların ileri mühendislik uygulamalarında, özellikle hafif ve dayanıklı malzeme tasarımlarında tercih edilmesi gerektiğini desteklemektedir.

Nguyen-Van ve diğerleri (2020), üç farklı kafes yapısının beton dayanımı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ilkel (primitive), gyroid ve tabanlı (based) hücresel yapılar temel alınarak çeşitli kafes modelleri tasarlanmıştır. Bu modellerin üretim sürecinde, beton dökümü öncesinde kalıp yüzeylerinde oluşabilecek boşlukların önlenmesi amacıyla, kalıpların ilgili bölgeleri kapatılmış ve böylece döküm sırasında istenmeyen hava ceplerinin oluşumu engellenmiştir. Bu yöntem, betonun homojen ve sıkı bir şekilde kalıba yerleşmesini sağlamış ve deneysel sonuçların doğruluğunu artırmıştır. Deneysel verilerin doğrulanması ve yapısal davranışların detaylı incelenmesi için sonlu elemanlar (FE) analizi kullanılmıştır. Bu sayede, farklı kafes geometrilerinin beton içindeki gerilme dağılımı ve yük taşıma kapasiteleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları ve deneysel bulgular birlikte değerlendirildiğinde, gyroid yapısının diğer iki kafes modeline kıyasla uygulanan yükleri daha etkin bir şekilde aktarabildiği ve dolayısıyla daha yüksek dayanım sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, PLA (Polilaktik Asit) desteklerinin kalıp yüzeyi olarak kullanılması, numunelerin mekanik performansı üzerinde anlamlı bir etki yaratmamıştır. Ancak, sonlu eleman analizleri, PLA desteklerinin yapısal sistemin tepki eğrisinde olumlu yönde tepe noktalarının oluşmasına ve eğim davranışının iyileşmesine katkı sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, PLA desteklerinin mekanik enerji dağılımını düzenleyerek, yük aktarım mekanizmasını stabilize ettiği şeklinde yorumlanabilir. Bu çalışma, farklı kafes geometrilerinin beton takviyesindeki performans farklılıklarını ortaya

koymakla kalmayıp, aynı zamanda üretim ve tasarım süreçlerinde kullanılabilecek yeni stratejiler için de önemli veriler sunmuştur. Gyroid yapısının üstün mekanik performansı, gelecekte betonarme yapıların optimize edilmesinde ve yenilikçi malzeme tasarımlarında tercih edilmesini desteklemektedir.

Peng ve Tran (2020), seçici lazer eritme (Selective Laser Melting, SLM**)** yöntemi ile AlSi10Mg tozu kullanarak üç boyutlu baskılar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, TPMS ailesine ait gyroid yapılarının performansını değerlendirmek amacıyla dinamik basınç yüklemesi ve patlama etkisi testleri uygulanmıştır. Gyroid yapıların dinamik basınç testlerinde, kırılma ve şekil değişimlerinin özellikle üst üste katlanma davranışı üzerinde durulmuştur. Bu davranışı daha iyi inceleyebilmek için farklı kalınlıklarda veya sağlam bölgelerde aynı mekanik davranışı gözlemlemek üzere sandviç panel tasarımı ideal olarak seçilmiştir. Araştırmacılar, iki çelik plaka arasına gyroid kafes yerleştirerek sandviç paneller üretmişlerdir. Üretim sürecinde, 3B yazıcı ile belirli katmanlarda gyroid yapısının duvar kalınlıkları değiştirilmiş; patlamaya yakın, orta ve alt bölgelerde farklı kalınlıklarda ancak toplamda aynı kafes yoğunluğuna sahip numuneler hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen patlama testlerinde, patlamaya yakın bölgede kalınlık artışının hasarı azalttığı ve kafes yapısının duvar kalınlıklarının değiştirilmesinin kullanım performansını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, gyroid kafes yapıların darbe ve patlama dayanımı açısından etkin bir performans sergilediği belirlenmiştir.

Salazar ve diğerleri (2020), polimerik kafes yapılar üretiminde sekizli hücresel kafes modelini tercih ederek bu yapının mekanik davranışlarını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Araştırmada, termoplastik malzemelerden PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) filamentler kullanılarak sekizli kafes yapısı kiriş ve küp formunda numuneler olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde eklemli imalat (additive manufacturing) teknolojisi kullanılarak, kafeslerin geometrik doğruluğu ve hacim oranları hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Çalışmada özellikle iki farklı hacim oranı (%19 ve %37) tercih edilerek, kafeslerin yapısal yoğunluğunun mekanik özelliklere etkisi analiz edilmiştir. Bu iki farklı hacim oranı, numunelerin dayanım, süneklik ve tokluk gibi mekanik parametreleri açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel aşamada, UHPC (Ultra Yüksek Performanslı Beton) ile takviye edilen kiriş ve küp numuneler kullanılmıştır. UHPC'nin yüksek dayanımı ve dayanıklılığı ile kafes yapının birleşimi, kompozit bir sistem oluşturarak mekanik performansın artmasına olanak sağlamıştır. Deney sonuçları göstermiştir ki, her iki hacim oranına sahip kafesli kirişler benzer

yük taşıma kapasiteleri sergilemekle birlikte, kirişlerin maruz kaldığı sehim miktarında ve tokluk değerlerinde anlamlı farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle, hacim oranı düşük olan (%19) kafesler daha yüksek süneklik ve tokluk sunarken, hacim oranının artmasıyla birlikte (%37) basınç dayanımı azalmakla beraber, yapı daha kırılgan bir karakter sergilemiştir. Bu durum, kafes yoğunluğunun artmasının, yapının enerji emme kapasitesi ve deformasyon yeteneği üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Mikro yapısal analizler kapsamında kiriş kırılma yüzeyleri incelenmiş ve uzama davranışları ile kırılma mekanizmalarındaki farklılıklar ortaya konmuştur. Kafesli yapının iç mimarisindeki hücresel düzen, betonun kırılma sürecinde gerilme dağılımını etkileyerek yapının genel süneklik ve tokluk performansına katkıda bulunmuştur. Bu bağlamda, polimerik kafes yapılar, betonun kırılma sonrası deformasyon kabiliyetini artırarak yapının ani kırılmalarını engellemiştir. Sonuç olarak, Salazar ve diğerlerinin çalışması, eklemli imalat ile üretilen polimerik kafes yapıların, beton takviyesinde yenilikçi bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, kafes geometrisinin ve hacim oranının mekanik performans üzerindeki etkilerinin detaylı analizi, ilerleyen mühendislik uygulamaları için önemli veriler sağlamaktadır. Bu tür kompozit yapıların, yapı mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında sürdürülebilir, hafif ve yüksek performanslı malzeme çözümleri geliştirilmesinde önemli bir potansiyel taşıdığı değerlendirilmektedir.

Higuera ve diğerleri (2021), gyroid kafeslerden oluşan dört farklı malzemenin mekanik performansını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada**,** PLA, ABS, TPU ve Poliamid 12 (PA12) filament malzemeleri seçilmiş ve üretim için FDM (Fused Deposition Modeling**)** yöntemi tercih edilmiştir. Üç farklı hücre boyutunda ve beş farklı hacim oranında numuneler hazırlanmıştır. PLA numunelerden elde edilen ilk sonuçlar, hücre boyutunun mekanik performans üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, belirli hacim oranlarında diğer malzemelerin performansına hacim oranının etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. En yüksek dayanım ve enerji emilimi sırasıyla ABS, PLA, PA12 ve TPU malzemelerinde gözlenmiştir. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinde, ilk akma noktasından sonra yük düşüşüyle yatay seyreden bölüme plato denmiştir. Platonun sona ermesinin ardından tekrar yük artışı gözlenmiş ve bu durum, kırılan ve üst üste katlanan yapının plato sonrası tamamen sıkışarak farklı bir yoğunluğa geçmesinin bir yansıması olarak yorumlanmıştır. Basınç deneyleri sırasında, hacimsel artışın tüm kafeslerde bükülmeler sonucu çökme meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Hacim oranının azalmasıyla bükülmeler daha fazla katmanlı oluşum göstermiştir. Özellikle, TPU malzemenin esnek yapısı nedeniyle kuvvet uygulandığında belirgin bükülme ve çökme göstermesi, onun en zayıf kafes performansına sahip olmasına neden olmuştur. Çalışmanın sonunda, hacim oranının

kafes yapılarında önemli bir etken olduğu; malzeme seçiminde kullanım alanına göre uygun malzemenin tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Zhu ve diğerleri (2021), ticari olarak satılan yapay kemik yapıların bazı eksikliklerini tespit etmiş ve özellikle kemik gelişimi açısından yetersiz kaldıklarını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, dijital ışık işleme (DLP) tabanlı üç boyutlu baskı yöntemi kullanarak biyocam kompozitlerden oluşan yapay kemikler üretmişlerdir. Üretim sürecinde, yapay kemik yapısı olarak gyroid kafes tasarımını tercih etmişlerdir. Tavşan kemik deneyleriyle gerçekleştirilen testlerde, gyroid yapının mekanik dayanımı piyasada mevcut yapay kemiklerle karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları, gyroid yapının üç boyutlu mimarisinin hücrelerin aktarımı, yerleşimi ve diziliminde etkin bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yapı, hücreler için gerekli besin iletiminde daha etkili olup, sadece belirli yüzeylerde değil, kemik dokusunun iç kısmında da hücre büyümesini desteklemiştir. Sonuç olarak, gyroid yapının kemik takviyesi ve rejenerasyonunda etkin bir model olduğu belirlenmiştir.

Qin ve diğerleri (2021), üç farklı kafes yapısı ve üç farklı malzeme türü seçimi kullanarak, çimento esaslı bağlayıcı ile takviye edilmiş kompozit kirişler üretmişlerdir. Çalışmada, **"**yeşil dolgu**"** olarak adlandırılan, altın madeni atığından elde edilen malzemenin çimento ile birleşmesi sonucu oluşturulan harç kullanılmıştır. Deneyler sırasında, numunelerin performansı DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi**)** ölçümleri ile belirlenmiştir. Test sonuçları, kafes takviyeli numunelerin tepe yüküne ulaştıktan sonra kırılmadığını, çoklu çatlak mekanizması sayesinde şekil değiştirmeye devam ettiğini göstermiştir. Özellikle OR ve eşkenar dörtgen kafes yapılarının, diğer modellere kıyasla daha yüksek tokluk değerleri sergilediği ve üstün performans gösterdiği gözlenmiştir.

Song ve diğerleri (2021), 3 boyutlu yazıcı kullanarak tasarladıkları kalıplar sayesinde, oktet kafes yapısına benzer bir geometriyle beton üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, reçine bazlı 3B yazıcı malzemesi tercih edilmiştir. Üretilen oktet kalıp yapısı içine akışkan beton harcı doldurulmuş ve beton sertleştikten sonra kalıp çıkartılmamıştır. Bu yaklaşım, Salazar'ın çalışmasından farklı olarak, kalıbın çıkartılmadan bırakılması ve numunelerin bu haliyle basınç dayanımı testine tabi tutulması şeklindedir. Deney sonuçları, kalıbın kullanılan betonun süneklik ve tokluk özelliklerini artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, numunelerde çoklu çatlak mekanizması gözlenmiştir.

Xu ve diğerleri (2021), farklı geometrilere sahip kafes sistemlerinin, betonarme kirişlerin performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, kirişin çekme bölgesinde kullanılmak üzere bir kafes yapısı tasarlanmıştır. Tasarımda, basit hücresel yapı olan oktet yapısı temel alınmış ve bu hücreler kiriş yapısına dönüştürülmüştür. Yük konumuna göre, kirişin ortasından simetrik olacak şekilde, yükün yoğun olduğu noktalara kısa oktet hücreleri yerleştirilmiş; kenarlara doğru ise aynı yapının daha uzun versiyonları kullanılmıştır. Bu sayede, yükün fazla geldiği bölgelerde daha sık bir kafes yapısı tercih edilerek, çatlak oluşumunun minimize edilmesi ve çatlak performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Kafesler, ABS filament kullanılarak üretilmiş ve beton ile kompozit hale getirilmiştir. Kafesli kiriş numuneleri, beton kirişlerle karşılaştırılmıştır. Deney sırasında DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu) ve CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) yöntemleri kullanılarak kafesli kirişlerin dayanımları modellenmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Eğilme deneyleri sonuçları, kafesli kirişlerin yüksek bir dayanım elde ettikten sonra ilk çatlak oluşumu ile yük düşüşü yaşadığını, ancak ardından tekrar yük taşıyarak şekil değiştirmeye devam ettiğini göstermiştir. Çoklu çatlak açılımı ve yüksek sünekliğin, kontrol numunesine göre kafesli kirişlerin daha yüksek tokluk sergilemesini sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı kafes yapıların beton içerisinde kullanımının ve bu yapıların analiz yöntemlerine uygunluğunun test edildiği çalışmada, bu tasarımların mekanik performansı desteklediği sonucuna varılmıştır.

Liu ve diğerleri (2022), seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemiyle beş farklı kafes yapısı üretmişlerdir. Çalışmada, hücresel tasarım olarak beş farklı hücre tipi seçilmiş ve bu hücrelerin tekrarı ile kafes yapılar oluşturulmuştur. Bu hücrelerden Ro olarak tanımlanan eşkenar dörtgen-kübik-oktahedron yapısı, diğerlerinden farklı ve özgün bir tasarım olarak değerlendirilmiştir. Kafes üretiminde PA6 malzemesi tercih edilmiştir. Üretilen kafesler, beton dökümü sonrasında hazırlanmış ve kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında numuneler DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu) ve AE (Akustik Emisyon) yöntemleri ile analiz edilmiştir. Test sonuçları, gerçek dayanım değerleri ile hesaplanan değerlerin büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir. Mekanik performans değerlendirmesinde, en iyi eğilme dayanımı Ro kafes yapısında gözlemlenirken, en yüksek tokluk değeri ise Cubic kafes yapısında kaydedilmiştir. Ayrıca, kafes yapılı çimento esaslı kirişlerin üç noktalı eğilme dayanımı beş farklı başlık altında incelenmiş ve bu incelemeler, yük düşüşü sonrasında dahi kafes yapılı kompozitlerin yük taşımaya devam ettiğini ortaya koymuştur. Çoklu çatlak mekanizması ile şekil değişiminin sürdüğü, bu durumun ise

numunelerin tokluklarını artırdığı belirlenmiştir. Son olarak, kafes yapılı kirişlerin kontrol numunelerine kıyasla daha sünek bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Skoratko ve diğerleri (2022), gyroid kafes sistemlerinde bağıl yoğunluk değişiminin, harç numunelerinin mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, gyroid kafes yapısını oluşturan matematiksel formül kullanılarak dört farklı yoğunluk ve hacimde kafes üretilmiştir. Kafeslerin üretiminde ABS filament tercih edilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyi ile, kafes kirişlerin şekil değiştirme davranışları değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, deneyler sonucunda benzer doğrusal eğim ve plato verilerine ulaşmış, ancak yoğunlaşma bölgesi kapsam dışı bırakılmıştır. Elde edilen bulgular, yoğunluk arttıkça enerji emiliminde belirgin bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Tokluk değerlerindeki bu yükseliş, üretilen gyroid kafeslerin enerji emilimi açısından üstün özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Chen ve diğerleri (2023), UHPC (Ultra-High Performance Concrete) betonun auxetik kafes yapıları içerisindeki performansını araştırmışlardır. Çalışmada, tercih edilen kafes yapıları FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisi kullanılarak PLA malzemesinden üretilmiştir. Araştırmacılar, oktet, Re-petek ve Re-üçgen kafes yapılarını üç boyutlu olarak yazıcıdan üretmenin destek yapıları nedeniyle zor olduğunu belirlemiş ve bu nedenle kafesleri parçalı olarak üretip, ardından yapıştırıcı kullanarak birleştirme yoluna gitmişlerdir. Üretimde ince kum, agrega olarak tercih edilmiştir. Kafes yapılı beton numunelerin performansını kıyaslamak amacıyla, referans olarak çelik lif içeren beton numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler, basınç dayanımı testine ve ek olarak dinamik basınç testine tabi tutulmuştur. Deneysel analiz sonuçları, çelik lif içeren beton numunenin 156 MPa ile en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Testler sonucunda, kafes yapısı içeren beton numunelerin, çelik lif katkılı betonlara göre daha düşük dayanım sergilediği, ancak sade betona kıyasla belirgin bir dayanım artışı sağladığı tespit edilmiştir.

Nguyen ve diğerleri (2023), üçlü periyodik minimal yüzey (TPMS) yapıları tasarlayarak bu yapıların mekanik davranış üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, biyolojik olarak deniz kestanesi kabuğundan ilham alınarak geliştirilen primitive (TPMS) yapısı ile kelebek kanadından ilham alınan gyroid yapı, düz tabanlı bir kafes yapısı ile karşılaştırılmıştır. Numuneler, PLA malzemesinden 3B baskı yöntemiyle üretilen kafes yapıları kullanılarak hazırlanmıştır. Gyroid kafes yapısının tasarımında, merkezinde model bulunan bir kafes

yerleştirilmiş; dolgu yapılacak beton birimlerin kalıplanabilmesi için ise beş yüzey desene uygun kapaklarla kapatılmıştır. Buna karşılık, primitive yapının geometrisi bu kapaklara gerek duyulmadan dolgu yapılmasına olanak sağlamıştır. Çalışmada hafif beton tercih edilmiş ve iki farklı yoğunlukta beton kullanılmıştır. Numunelerin doluluk oranlarını belirlemek amacıyla X-ışını bilgisayarlı tomografi (X-BT) taramaları gerçekleştirilmiştir. Çatlak yayılımları ve mekanik deney sonuçları ise ABAQUS yazılımı kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiş ve elde edilen bulgular gerçek numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. X-BT taramalarına göre, hava keseciklerinin farklı yüzeylerde ve seviyelerde konumlandığı görülmüş; bu durumun çatlak yayılımını azalttığı ve dolayısıyla numunelerin basınç dayanımı ile diğer mekanik dayanımlarının artmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yapıların beton ile dolum sürecinde boşluk dağılımını değiştirmesi de deney sonuçlarını etkileyen önemli bir faktör olmuştur. Analiz sonuçları ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında, geliştirilen modelin uygun olduğu ve ABAQUS yazılımının bu tür analizlerde başarılı bir şekilde kullanılabileceği doğrulanmıştır. PLA malzemenin kalıp olarak kullanılmasıyla, şekil değiştirme sonrası beton yüzeyinden kolayca ayrıldığı ve çatlak desenlerinin hem model hem de analiz sonuçları ile hem de X-BT taramalarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmanın genel bulguları, gyroid kafes yapısının diğer TPMS ve düz kafes yapılarına kıyasla daha üstün mekanik performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Tang ve diğerleri (2023), Multi Jet Fusion (MJF) teknolojisini kullanarak farklı kafes modelleri üretmiş ve bu yapıları beton ile entegre ederek mekanik performanslarını incelemiştir. Çalışmada öncelikle kübik geometriye sahip üç boyutlu kafes modelleri tasarlanmış ve bu kübik kafesler, deneylerde kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Araştırmacılar, toplamda altı farklı kübik hücre tasarımı belirlemiş ve bunları, yapısal davranışın farklı yönlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla kullanmıştır. Çalışmanın özgün yönlerinden biri, dereceli kafes sistemi (graded lattice system) olarak adlandırdıkları bir tasarım anlayışının geliştirilmiş olmasıdır. Bu yaklaşımda, eğilme yüklerinin yoğunlaştığı bölgelerde daha yüksek dayanımlı kafes elemanları kullanılırken, çatlama riskinin düşük olduğu alanlarda daha düşük yoğunluklu kafes yapıları tercih edilmiştir. Böylece hem malzeme kullanımı optimize edilmiş hem de farklı bölgelerin yük taşıma kabiliyeti, hedeflenen davranışa göre özelleştirilmiştir. Tasarım sürecinde, özellikle eğilme yükü altında en fazla zorlanacak bölgelerin piramit benzeri yapılarda yoğunlaştırıldığı, kenar bölgelerde ise daha seyrek kafeslere yer verildiği görülmektedir. Kafes yapılarının bir bütün olarak çalışabilmesi için model, parçalara ayrılarak tasarlanmış ancak MJF yazıcı ile tek seferde bütünleşik şekilde üretilmiştir. Bu teknik yaklaşım, üretim sonrası montaj

gereksinimini ortadan kaldırmış ve modelin yapısal bütünlüğünü korumuştur. Üretilen kafeslerin içerisine beton dökülerek hibrit numuneler elde edilmiştir. Numunelerin eğilme davranışları, Dijital İmaj Korelasyonu (DIC) yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. DIC, çatlak oluşumu ve ilerlemesini yüksek doğrulukla takip etmeyi sağlayarak tasarımların yük altındaki davranışlarını ayrıntılı şekilde analiz etme olanağı sunmuştur. Elde edilen bulgular, tek parça ve homojen kafes tasarımlarının, kontrol beton numunelerine benzer şekilde, tek bir çatlak üzerinden ani kırılma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Buna karşın, dereceli kafes tasarımları yalnızca tepe yükünü (peak load) artırmakla kalmamış, aynı zamanda çatlak ilerleme mekanizmasını da değiştirmiştir. Dereceli yapıların yük altındaki deformasyon davranışı, enerjiyi absorbe eden ve daha kontrollü çatlak dağılımı sağlayan bir yapı sergilemiştir. Tang ve diğerleri (2023) çalışması, dereceli kafes tasarımı konseptinin, yalnızca statik dayanım üzerinde değil, aynı zamanda çatlak yönetimi ve hasar toleransı üzerinde de önemli iyileştirmeler sunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kullanım amacına ve beklenen yükleme koşullarına göre dereceli kafes sistemlerinin, geleneksel homojen kafes tasarımlarına kıyasla daha uygun bir alternatif oluşturduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Son yıllarda, üç boyutlu periyodik minimal yüzeyler (Triply Periodic Minimal Surfaces – TPMS) ailesinin en dikkat çekici üyelerinden biri olan gyroid yapı, farklı disiplinlerde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Kendine özgü geometrisi sayesinde yüksek yüzey alanı, izotropik mekanik davranış ve malzeme verimliliği sunan gyroid kafesler; inşaat mühendisliğinden biyomedikal tasarıma, fotonik uygulamalardan biyomimetik çalışmalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Literatürde, PLA, ABS ve PA12 gibi polimer bazlı kafeslerin beton takviyesinde süneklik ve tokluk artırıcı etkileri incelenmiş (Salazar ve diğerleri, 2018; Abueidda ve diğerleri, 2019), metal tabanlı gyroid yapıların kemik benzeri mekanik özellikleri sayesinde implant tasarımına uygunluğu ortaya konmuştur (Yang ve diğerleri, 2019a). Bunun yanında, doğada kelebek kanatlarında gözlenen gyroid morfolojilerinin ışık yansıtma ve renk üretim mekanizmalarına dair çalışmalar (Mille ve diğerleri, 2011; Saba ve diğerleri, 2014), biyomimetik tasarımlara ilham vermektedir. Suzuki ve diğerleri (2000) gibi araştırmalar ise bu yapıların kopolimer morfolojilerinde de doğal olarak oluştuğunu göstermiştir. Bu kapsamlı literatür, gyroid yapının çok disiplinli potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda uzun vadeli performans, ölçeklendirme ve fonksiyonel entegrasyon gibi araştırma boşluklarını da gözler önüne sermektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, gyroid ve diğer kafes yapıların beton takviyesinde süneklik ve tokluk artırıcı bir unsur olduğu kanıtlamakta olup farklı hacim oranları ve hücre geometrilerinin mekanik davranış üzerindeki etkilerinin laboratuvar ölçekli kalmış olduğu görülmektedir. Diğer yandan, uygulamalarda eksiklikler mevcut olup PLA gibi biyobozunur malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığına dair verilerin de sınırlı olduğu görülmektedir.

2.5.3. Metal tabanlı gyroid yapılar ve biyomedikal uygulamalar ile ilgili çalışmalar

Jo Yoon, Lee ve Moon (2017), çalışmasında, gyroid kafes yapısının üstün geometrik ve fonksiyonel özelliklerinden yararlanarak, TiO (Titanyum Dioksit) tozu içeren PLA (Polilaktik Asit) filament kompozitlerini incelemişlerdir. Araştırmada, TiO tozunun PLA filament içine homojen bir şekilde dağıtılması sağlanarak, bu kompozit filamentlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. PLA'nın zamanla biyobozunur (biyolojik olarak parçalanabilen) bir malzeme olması, üretilen yapıların belirli koşullar altında çözünerek çevresel veya biyolojik ortamlarla etkileşime girebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, PLA bazlı yapılar içerisine eklenen TiO gibi aktif elementlerin, zamanla kimyasal reaksiyonlar yoluyla çözünmesi veya fonksiyonel ürünler oluşturması beklenmektedir. Gyroid yapısının üç boyutlu periyodik minimal yüzey (TPMS) geometrisi, yüksek yüzey alanı ve temas noktası sayısı sayesinde ışık yayılımını artırmakta ve ışığın yapıda homojen şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, fotokatalitik etkinlik ve adsorpsiyon kapasitesinin optimize edilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Araştırmada, biyobozunur PLA matrisine entegre edilen TiO_2 partikülleri sayesinde, kompozit yapıların hızlı fotokatalitik aktivite ve yüksek adsorpsiyon yetenekleri sergilediği ortaya konmuştur. Gyroid yapısının benzersiz morfolojisi, yüzey reaksiyonlarının verimliliğini artırarak, çevresel uygulamalar başta olmak üzere özellikle su arıtma, hava temizleme ve dezenfeksiyon gibi alanlarda kullanımı için uygun bir platform sağlamaktadır. Ayrıca, biyobozunur malzeme yapısının zamanla çözünme özelliği, kontrollü salım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. Bu özellik sayesinde, yapıların ilaç sektörü gibi biyomedikal alanlarda, kontrollü ilaç salınımı ve absorpsiyon işlevleri için de kullanılabilirliği savunulmuştur. Bu yaklaşım hem çevresel sürdürülebilirlik hem de fonksiyonel malzeme tasarımı açısından yenilikçi çözümler sunmaktadır. Sonuç olarak, araştırma gyroid yapısının yüksek yüzey alanı ve biyobozunur kompozit malzemelerle birleştiğinde fotokatalitik ve adsorpsiyon performanslarının artırılmasına yönelik potansiyelini ortaya koymuştur. Bu sayede, sürdürülebilir ve fonksiyonel malzeme tasarımlarında yeni nesil uygulamalara kapı aralamaktadır.

Yang ve diğerleri (2019a), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Melting-SLM) teknolojisini kullanarak Ti-6Al-4V alaşımından gyroid kafes yapılar üretmişlerdir. Çalışmalarının ilk aşamasında, üretilen gyroid kafeslerin mekanik davranışlarının insan kemiği ile benzerlik taşıyıp taşımadığı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, kafes yapısının biyomekanik uyumu üzerine odaklanılarak hem yapısal dayanım hem de elastik modül açısından insan kemiğine yakın değerler elde edilmiştir. Araştırmanın ilerleyen aşamalarında, gyroid kafes yapısının değişken parametreler kullanılarak yeniden tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu sayede farklı tasarım ve model varyasyonları ortaya konmuştur. Parametrelerin etkisi incelendiğinde, hücre sayısının artırılmasının, dayanım üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğu, duvar kalınlıklarındaki artışa kıyasla daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgu, hücresel yapının mikro mimarisinin optimize edilmesinde hücre yoğunluğunun kritik bir parametre olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, izodeğer (isovalue) ve yığıntı faktörü (stacking factor) gibi farklı tasarım parametrelerinin mekanik performansa etkilerini incelemek amacıyla daha fazla sayıda numune test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik hücresel yapı mekaniği alanında Gibson ve Ashby tarafından tanımlanan denklemlerle uyumlu performans göstermiştir. Bu da malzeme ve yapı davranışlarının öngörülebilirliğini artırmıştır. Son deneysel aşamada, gyroid yapısının mekanik performansını etkileyen dört temel parametrenin önem derecesini belirlemek amacıyla Taguchi analizi uygulanmıştır. Bu istatistiksel yöntem sayesinde, her parametrenin dayanım ve elastikiyet üzerindeki etkileri ayrıntılı şekilde ortaya çıkarılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, en ideal optimize edilmiş gyroid kafes modeli; yedi hücreden oluşan, 40 mm küp hacme sahip, sıfır izodeğer içeren ve 0,55 mm yüzey kalınlığına sahip bir yapı olarak belirlenmiştir. Bu ideal model, deneysel testlere tabi tutulduğunda, beklenen insan kemiği performansını aşan mekanik özellikler sergilemiştir. Sabit kafes ile y yönündeki numuneler benzer tepe noktası ve eğimler gösterirken z yönünde azalan kafesler farklı performans göstermiştir. Katman katman ezilme davranışı benzer farklılıklar göstermiştir. Kuvvete dik ve paralel yapı tasarımının farklı performansı tasarımın etkisini yansıtmaktadır. Bu sonuçlar, SLM teknolojisi ile üretilen Ti- 6Al-4V gyroid kafeslerin, biyomedikal uygulamalarda özellikle kemik doku mühendisliği ve implant tasarımında büyük bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Yang, Mertens, Ferruci, Yan, Shi, Yang, (2019b) gyroid yapıların mekanik özelliklerini SLM teknolojisi ve A316 L tozu kullanarak üretimlerini yaptıkları kafesler üzerinden incelemiştir. Kafes yapılarının farklı geometri özelliklerini değiştirerek aslında yapının yoğunluğunu değiştirmişlerdir. Sabit bir gyroid kafes yapısını, yukarı doğru hacmi ve yoğunluğu azalan kafes yapsını ve y yönünde hacmi yoğunluğu azalan kafes yapıları ile kıyaslamıştır. Tüm numuneler

Gibson ve ashby nin tanımladığı gibi basınç testi altından üç rejim sergiler: doğrusal elastik, plato, yoğunlaştırma rejimi. Sabit kafes ile y yönündeki numuneler benzer tepe noktası ve eğimler gösterirken z yönünde azalan kafesler farklı performans göstermiştir. Katman katman ezilme davranışı benzer farklılıklar göstermiştir. Kuvvete dik ve paralel yapı tasarımının farklı performansı tasarımın etkisini yansıtmaktadır.

Hao, Liu ve Kanwal (2023), çalışmaları kapsamında hücresel tasarımları birbirinden farklı altı farklı kafes yapısı geliştirmiştir. Her bir hücre biriminin tekrarı ile altı ayrı kafes sistemi oluşturulmuş ve bu sistemler PA6 malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kafesler, ardından çimento esaslı bir harç ile kalıplanarak kompozit numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan çimento esaslı kompozit numuneler üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu testler DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu) yöntemiyle detaylı olarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kafes yapıların kompozit malzemelerin basınç dayanımını kontrol numunelerine kıyasla artırdığını, çatlak dayanımını geliştirdiğini ve ayrıca yanal genleşme deformasyonunu engellediğini ortaya koymuştur. Çalışmanın sonunda, bu tür kafes yapılarının yalnızca yapısal güçlendirme için değil, aynı zamanda darbe dayanımı gerektiren birçok mühendislik uygulamasında kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Li, Cao ve Song (2023), çalışmalarında üç farklı kafes modeli üzerinde durmuşlardır: Oktet, kübik ve hekzagon yapılar. Bu kafesler, üç farklı malzeme kullanılarak 3B baskı yöntemiyle üretilmiş ve ardından altın madeni atığı ile çimentodan oluşan özel bir harç kullanılarak kalıplara alınmıştır. Numuneler üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçları, OR malzemelerinin kullanıldığı küp ve oktet yapılı kafes sistemlerin en yüksek tokluk ve süneklik değerlerini sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu) ve X-ışını BT testlerinden elde edilen bulgular, çoklu çatlak davranışının, kafes sistemlerin beton harcının mekanik özelliklerini geliştirmede etkin bir rol oynadığını göstermektedir.

Xie, Li, Zhao ve Hu (2023), altı farklı kafes yapısının mekanik performansını incelemişlerdir. Çalışmada, tasarlanan kafeslerin üçünde ortada etkileşimleri değerlendirmek için boşluklu hacim tercih edilirken; diğer üçünde, ortadaki hacmi bölen destek elemanları tasarlanmıştır. İncelenen modeller; Altılı, Warmuth, Vintiles, Re-entrant, Oktet ve Tesseract kafes yapılarıdır. Tüm kafesler PLA malzemesi kullanılarak 3B baskı yöntemiyle üretilmiştir. Numuneler üzerinde hem boş kafes yapılarına hem de beton ile doldurulmuş kafeslere yönelik basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçları,

sonraki aşamada yapılacak eğilme testleri için model tercihlerini şekillendirmiştir. Elde edilen veriler, boş kafes ve beton içindeki kafes yapıların karşılaştırılmasını mümkün kılmış; süneklik, tokluk ve tepe yükü değerleri sonlu eleman (FE) analizleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, farklı hacim oranlarının artmasıyla birlikte kafes yapıların tokluk, süneklik ve tepe yükü değerlerinde yükselme olduğunu göstermiştir. Ayrıca, her bir kafes modelinin mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlemlenmiştir: Oktet yapısı en yüksek tokluk değerini sergilerken, Re-entrant yapısı en yüksek süneklik değerine ulaşmıştır. Araştırmanın bir diğer önemli bulgusu, iç yapısı kafes tasarımına göre devam eden modellerin, kesintili hacme sahip modellere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı göstermesidir.

Choudhry, Nguyen, Nguyen-Van, Panda ve Tran (2024) yürüttüğü çalışmada, auxetik kafes yapılarının betonun mekanik performansına etkilerini incelemek amacıyla dört farklı model tasarımı tercih edilmiştir. Numuneler, FDM (Fused Deposition Modeling) tipi üç boyutlu yazıcı kullanılarak, ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) filamentten üretilmiştir. Çalışmada auxetik modellerin seçilmesinin gerekçesi, bu yapıların negatif Poisson oranına sahip olmaları, malzeme deformasyonu sırasında özgün hacimsel oran değişimlerini yönetebilmeleri ve Maxwell kararlılık faktörünün uygun değerler sunması olarak ifade edilmiştir. Auxetik yapıların bu karakteristik özellikleri, özellikle beton gibi gevrek malzemelerin davranışını modifiye etmede potansiyel bir avantaj sağlamaktadır. Numunelerin 3 cm kalınlığında kesitler halinde tasarlanması, üç boyutlu hacimsel bir kafes yerine iki boyutlu kesitler üzerinden deneysel çalışmalar yapılmasına imkân tanımış; böylece, modelleme ve üretim süreçleri kolaylaştırılırken testlerde parametrelerin daha kontrollü bir şekilde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan dört farklı auxetik modelin geometrik parametreleri, kafes yoğunlukları ve hücre yapıları birbirinden farklı tasarlanarak, geometri–mekanik performans ilişkisi daha ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Basınç dayanımı testleri sonucunda, auxetik kafes yapılarının beton numunelerin tokluk (toughness) ve süneklilik (ductility) değerlerinde kayda değer artışlar sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, auxetik geometrilerin çatlak ilerlemesini yönlendirme ve enerjiyi dağıtma kapasiteleriyle ilişkilendirilmiştir. Testlerde gözlenen çatlak ilerleme desenleri, kullanılan model tasarımlarının farklılığına bağlı olarak değişiklik göstermiş ve her bir kafes tipinin betonun kırılma davranışına farklı şekilde etki ettiğini ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca Young modülü (E), süneklilik katsayıları ve FE (Sonlu Elemanlar) analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. FE analizleri, deneysel verilerle yüksek oranda uyumlu sonuçlar üretmiş; bu da tasarlanan modellerin simülasyon ortamında öngörülen davranışlarının laboratuvar bulgularıyla örtüştüğünü göstermiştir. Bulgular, auxetik kafes yapılarının betonun

elastisite özelliklerini iyileştirdiğini ve deformasyon altında daha kontrollü bir gerilme–şekil değiştirme davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, hacimsel olarak kafes yapılarının beton içinde yer alması, numunelerin basınç dayanımını kısmen düşürmüştür. Bu sonuç, kafeslerin betonun yük taşıyan kesit alanını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu dayanım kaybı, tokluk ve süneklilikte gözlenen belirgin iyileşmeler ile dengelenmiş, malzemenin ani kırılma eğilimi yerine daha enerji absorbe eden bir davranış sergilemesi sağlanmıştır. Choudhry ve diğerleri (2024) çalışması, auxetik kafes yapıların beton kompozitlerinde kullanımıyla ilgili literatüre önemli katkılar sunmakta ve negatif Poisson oranına sahip geometrilerin, beton gibi geleneksel olarak gevrek malzemelerde süneklik ve enerji emme kapasitesi kazandırma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Üç boyutlu yazıcılarla üretilen kafes yapılar için çimento esaslı harç karışımı hazırlamak amacıyla yapılan karışımlarda CEM I 42,5 N tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

3.1.2. Mineral katkılar

Yüksek fırın cürufu

Çimento yerine kısmi bağlayıcı olarak kullanılan, çelik üretimi yan ürünü olan puzolanik özellikli bir malzemedir. Yüksek fırın cürufu (YFC)'nun en büyük avantajı sülfat ve klorür saldırısına karşı betonun direncini arttırmasıdır. Ayrıca, düşük ısılı hidratasyon reaksiyonu ile betonun çatlama riskini azaltır, bu da gyroid yapı ile uyumlu, bütüncül bir yapı elde edilmesini kolaylaştırır (Higuera ve diğerleri, 2021; Chen ve diğerleri, 2023). Çalışmada kullanılan Yüksek fırın cürufu İskenderun çimento fabrikasından temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Silis dumanı

Silis dumanı, mikron altı boyutlu parçacıkları sayesinde betonun boşluk yapısını doldurarak yoğunluk, dayanım ve geçirimsizlik sağlar. Özellikle kafeslerin ince hücre boşluklarını doldururken daha homojen bir matris oluşturulmasına katkıda bulunur. Çalışmada kullanılan silis dumanına ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Uçucu kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül F sınıfı olup Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento ve mineral katkıların kimyasal analizi

Bileşen *(%)*	Çimento	Yüksek fırın cürufu	Uçucu Kül	Silis dumanı
SiO_2	19,06	36,65	55,44	90,14
CaO	60,90	31,45	2,18	2,33
Al_2O_3	5,32	14,32	24,93	0,42
Fe_2O_3	3,18	0,97	6,33	0,27
MgO	2,16	10,02	2,38	4,42
SO_3	3,47	0,98	0,14	0,22
Na_2O	0,74	0,45	0,49	0,53
K_2O	1,41	0,74	3,87	0,81
Kızdırma kaybı	3,7	-	-	0,42

3**.1.3. Agrega**

Kuvars kumu**,** ince granül yapısı nedeniyle özel tasarım betonlarda tercih edilen bir agregadır. Kafes yapıların iç boşluklarını tıkamadan betonun akışkanlığını korur ve yüksek dayanım için gerekli olan granülometriyi optimize eder. İnce tane boyutu sayesinde agrega geçiş bölgelerinde (ITZ) boşluk oluşumunu engeller, bu da kafes yapının yüzeyine daha iyi yapışmasını sağlar (Nguyen ve diğerleri, 2023). Çalışmada kullanılan kuvars kumu 0-3 mm aralığında kullanılmıştır.

3.1.4. Akışkanlaştırıcı

Kafes yapılar, kompleks geometrileri nedeniyle betonun kolayca akabilmesini ve boşlukları doldurabilmesini gerektirir. Bu nedenle çalışmada polikarboksilik eter esaslı süperakışkanlaştırıcı (SP) katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı, yüksek akışkanlık sağlarken su miktarını artırmadan çalışılabilirliği yükseltir ve düşük su/çimento oranı korunarak yüksek dayanım elde edilmesini sağlar. Çalışmada çimento esaslı harç karışımının daha akışkan hale getirilmesi ve su içeriğinin azaltılması amacıyla, polikarboksilik eter bazlı yüksek performanslı bir su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı malzemenin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Akışkanlaştırıcı malzemenin özellikleri

Renk ve form	Kahverengi
Yoğunluk (kg/lt)	1,14-1,08 kg/litre
Klor içeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-12)	< 3
pH	5-7

3.1.5. Su

Çimento esaslı harç karışımında hidratasyon reaksiyonunu başlatan en temel bileşen sudur. Su renksiz kokusuz ve içilebilir olmalıdır. Araştırmada kullanılacak suyun kalitesi, harcın performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, kullanılan suyun TS EN 1008 standardının gerekliliklerini karşılaması zorunludur. Deneylerde bu standardı sağlayan Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.6. Lifler

Çimento esaslı harç karışımlarında çelik lif (ÇL) ve sentetik lif (SL) olarak iki farklı lif kullanılmıştır. Liflere ait örnekler resimler Resim 3.1'de verilmiştir.



Resim 3.1. (a) Çelik lif (b) Sentetik lif

Lifli harç içeriğinde sika PPM-12 polipropilene mikro lif bir metreküpte 1200 gram olacak şekilde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Sentetik lifin ve çelik lifin genel özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çelik lif (ÇL) ve Sentetik lif (SL) in genel özellikleri

Özellik	Çelik Lif (KMX40/30BL)	Sentetik Lif (Sika ppm-12)
Çekme Dayanımı	1 000-3 000 MPa	300-700 MPa
Lif Uzunluğu	30 mm	10-20 mm
Çap	0.15-0,75 mm	10-50 mikron
Yoğunluk	~7.85 g/cm^3	~0.91 g/cm^3
Ortalama dozaj	%1,5–2.5 (hacimce)	0.6–1,0 kg/m^3 (hacmen çok düşük oran)
İlgili Standart	EN 14889-2	TS EN 14889-1

Çelik lif; yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahiptir. Süneklik ve enerji yutma kapasitesi, mikroskobik çatlak kontrolü ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlar (gevrek kırılmayı önler) ve kalıp çatlamasını önlemektedir. Çelik ve sentetik lifler birbirini tamamlayıcı şekilde kullanılır.

Çalışmada çelik lifli numunelerin üretiminde, Kemerix çift ucu kancalı çelik lif tercih edilmiştir. Üreticinin 1 m^3 için belirtiği oranın minimumu (25 kg) tercih edilmiştir.

3.1.7. Filament

Kafeslerin üretiminde, 3B yazıcı ile uyumlu PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) ve TPU (Termoplastik Poliüretan) filamentleri kullanılmıştır. Kullanılan filamentlerin çapı 1,75 mm olup, üretim öncesinde filament nemlenmesini önlemek için düşük sıcaklıkta kurutma işlemi uygulanmıştır. Filamentlerin özellikleri üreticiden alınmıştır. Çizelge 3.4'te filamentlerin teknik özellikleri gösterilmektedir. Ayrıca Çizelge 3.5'te çalışmada kullanılan filamentlerin karşılaştırılmalı bazı özellikleri verilmiştir (Farid, Wu, WeiGui ve Zhao, 2023).

Çizelge 3.4. TPU, PETG filamentlerinin teknik özellikleri

	Çekme dayanımı (Mpa)	Elastik modül (MPa)	Eğilme dayanımı (Mpa)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk g/cm^3
TPU	15	800	20	780	1,43
PETG	49	1 800	68	25	1,23

Çizelge 3.5. PETG ve TPU filamentlerin karşılaştırılması

Özellik	PETG	TPU
Sertlik	Orta-sert	Yumuşak-esnek
Elastik modül	Yüksek (~2400MPa)	Düşük (~10-50MPa)
Kopma uzaması	Düşük (%6-%25)	Çok yüksek (%400-%800)
Darbe dayanımı	Orta-iyi	Çok iyi
Esneklik	Düşük	Yüksek

3.2. Yöntem

Bu bölümde yöntem iki alt başlıkta ele alınmıştır. İlk olarak kafes yapıların modellenerek basılması ve ikinci olarak da kullanılacak çimento esaslı lifli ve lifsiz harcın hazırlanması ele alınmıştır.

Harç içerisinde liflerin homojen dağılımı için iki farklı kafes model yapısı (Fluorite, gyroid) belirlenmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile kafes yapılar üretilmiştir. Farklı filamentler (TPU ve PETG) kullanılarak kafes yapılar üç boyutlu yazıcı ile basılmıştır. Her bir kafes yapısının basılması üç boyutlu yazıcı ile 24 saat sürmüştür.

3.2.1. Kafes yapıların modellenmesi

Bu çalışmada kullanılan polimer kafes yapılar, beton ile hibrit kompozit bir sistem oluşturmak ve nihai yapının tokluk, süneklik ve enerji emme kapasitesini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Polimer kafesler, literatürde (Jo ve diğerleri, 2017; Nguyen ve diğerleri, 2023; Salazar ve diğerleri, 2018) de belirtildiği üzere, beton içerisine gömüldüğünde çatlak ilerlemesini yavaşlatan, yük transferini optimize eden ve kırılma davranışını iyileştiren bir "iç iskelet" görevi üstlenmektedir. Bu tez kapsamında gyroid ve oktet ailesine ait fluorite gibi farklı üç boyutlu periyodik minimal yüzey (TPMS) geometrileri kullanılarak kafes modelleri oluşturulmuştur. Her bir modelin hücre boyutu, duvar kalınlığı ve bağıl yoğunluğu değiştirilerek mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretim sürecinde FDM (Fused Deposition Modeling) teknolojisine sahip üç boyutlu yazıcı kullanılmış, kafesler, TPU ve PETG filamentlerle üretilmiştir. Bu malzemeler hem yüksek baskı hassasiyeti hem de betonla kimyasal ve mekanik uyumluluk açısından tercih edilmiştir. Üretilen polimer kafesler, yüzeyde oluşabilecek üretim artıkları temizlendikten sonra beton dökümüne hazır hâle getirilmiş, böylece kompozit numunelerde istenen geometri ve malzeme bütünlüğü sağlanmıştır.

Üç boyutlu yazıcı

Çalışmada kullanılan kafes yapılar, FDM (Fused Deposition Modeling**)** teknolojisine sahip bir üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. FDM yöntemi, termoplastik filamentin ısıtılarak eritilmesi ve katman katman serilmesi esasına dayanır. Bu teknik, karmaşık geometrilerin, özellikle de gyroid ve diğer hücresel kafes yapılarının hassas şekilde üretilmesine olanak tanır. Kullanılan yazıcının, 0,4 mm çapında nozül ucu, 0,1–0,3 mm aralığında katman kalınlığı ayarı bulunmaktadır. Ayrıca, tabla ısısının ve nozül sıcaklığının hassas kontrol edilebilmesi, farklı filament türlerinin kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

Kafes modelleri

Bu tez kapsamında, literatürde yaygın olarak kullanılan gyroid, oktet gibi üç boyutlu periyodik minimal yüzey (TPMS**)** temelli kafes modelleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Modeller, hücre boyutu, duvar kalınlığı ve bağıl yoğunluk açısından farklılaştırılarak mekanik performansın değişimi araştırılmıştır. Gyroid yapısı, izotropik yük taşıma kapasitesi ve yüksek yüzey alanı ile öne çıkarken; oktet model, düğüm noktalarındaki rijit

bağlantılar sayesinde yüksek dayanım sağlamaktadır. Oktet model için ayrıca sekiz yüzlüler ailesinden olan fluorite kristal yapısı tercih edilmiştir. Farklı geometrilerin kullanılması, beton ile etkileşim ve yük transfer mekanizmalarının kıyaslanmasına olanak tanımıştır.

Modellerin tasarımı

Kafes modelleri, CAD tabanlı modelleme yazılımları (SolidWorks ve Rhino 3B) kullanılarak tasarlanmıştır. Gyroid ve fluorite yapılarının parametrik tasarımı için Mathematica tabanlı denklemler ve "lattice generation" eklentileri kullanılmıştır. Hücre boyutu (5 mm, 10 mm), duvar kalınlığı (0,4 mm, 0,8 mm) ve bağıl yoğunluk (%20, %40) gibi değişkenler tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Her model, STL (Standard Tessellation Language) formatında kaydedilerek 3B yazıcı yazılımına aktarılmıştır. Bu parametrik yaklaşım hem üretim sürecinin esnekliğini artırmış hem de deneysel testlerde farklı geometrilerin karşılaştırılmasına imkân tanımıştır.

3.2.2. Kafes yapıların üretilmesi

Tasarımı tamamlanan modeller, FDM tabanlı 3B yazıcıya aktarıldıktan sonra üretim sürecine geçilmiştir. Yazıcı parametreleri, her modelin geometrisine göre optimize edilmiştir:

- Nozül sıcaklığı: PETG için 230–250 °C, TPU için 210–240 °C
- Tabla sıcaklığı: PETG için 60–80 °C, TPU için 60–80 °C
- Katman kalınlığı: 0,2 mm
- Doluluk oranı: %100 (duvar kalınlığı sabit, içi dolu hücre duvarları)

Üretim sırasında yazıcının tabla kalibrasyonu ve katman yapışması sürekli kontrol edilmiş, her kafes yapısı üretimden sonra görsel ve boyutsal muayeneden geçirilmiştir. Kafeslerin üretimi tamamlandıktan sonra, yüzeyde oluşabilecek baskı artıkları temizlenmiş ve beton dökümüne hazır hale getirilmiştir**.**

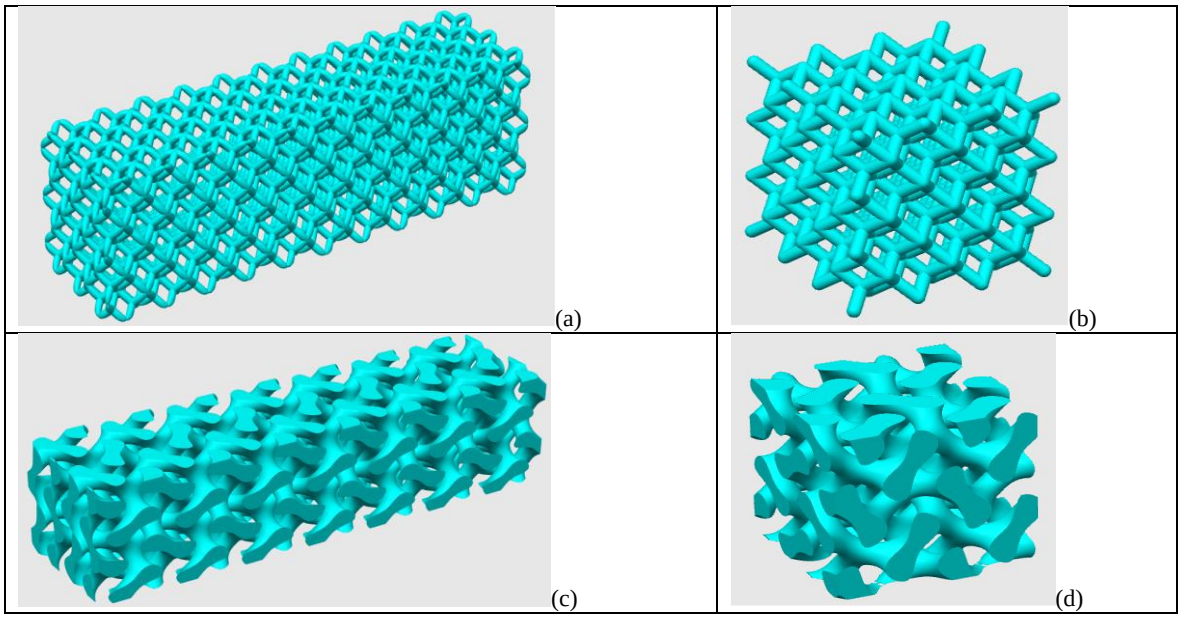
Çalışmada, fluorite ve gyroid kafes model yapılarının kullanılması tercih edilmiştir. Fluorite kafes yapısı yüzey merkezli kübik kafes yapısını temsil eden benzersiz, birbirini kesen köşe noktalardan oluşur. Bu yapı birbirinin içerisine geçerek tekrarlayan üç boyutlu yapı modelleri arasındaki en iyi dayanım özellikleri gösteren modellerden birisi olduğu için çalışma kapsamında seçilmiştir. 45^0 'lik açılar ile düğüm noktalarını oluşturan uzay kafes sistemi şeklindedir.

Diğer model ise Gyroid'tir. Gyroid kafes yapısı organik olup hafiflik, dayanıklılık ve yüksek yüzey alanı gerektiren uygulamalarda özellikle 3B baskıda kullanılır. Hem en yüksek hacim yapısı ile hacmi doldururken hem de en boşluklu yapısı ile doluluk oranını azaltmaktadır. Birbirini tekrar eden köşesiz yapısı betonun dayanımına, maksimum dayanım hedefine büyük katkıyı sağlayacağı öngörülmüştür (Karabulut ve Yazıcıoğlu, 2025). Üretilen kafes yapıların basınç ve eğilme testlerinde kullanılacak örneklerin geometrik özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kafes yapıların genel özellikleri

Örnekler	Hücresel kafes boyu (mm)	Kalınlık (mm)	Kafes takviyeli beton küp kalıp boyutları (mm)	Birim hücre kafes sayısı	Kapladığı hacim oranı
Gyroid küp (Basınç ve darbe dayanımı)	67x67x67	4	70x70x70	5x5x5	%33,0
Fluorite küp (Basınç ve darbe dayanımı)	67x67x67	4	70x70x70	5x5x5	%18,0
Gyroid kiriş (Eğilme dayanımı)	67x67x267	4	70x70x270	5x5x21	%34,0
Fluorite kiriş (Eğilme dayanımı)	67x67x267	4	70x70x270	5x5x21	%19,0

Görselleri çizim programı ile elde edilen kafesler Şekil 3.1'de verilmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile basılan kafes modeller, hazırlanan kalıplar içerisine yerleştirilmiş ve kalıplar çimento esaslı harç ile doldurulmuştur.



Şekil 3.1. Kafes takviyeli beton küp ve kiriş modelleri (a) Fluorite kiriş (b) Fluorite küp (c) Gyroid kiriş (d) Gyroid küp

3.2.3. Karışımların hazırlanması ve oranları

Bu çalışmada TS EN 197-1 ve TS EN 15167-1 standardına göre harç karışımları üretilmiştir ve üretilen bu karışımlarda CEM I 42,5 N tipi çimento kullanılmıştır. Bu kapsamda, çeşitli testler yapılarak, bu katkı malzemelerinin harcın özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu deneylerde, 932 kg/m³ bağlayıcı miktarına sahip harç karışımları kullanılmış ve bir kontrol numunesi ile birlikte karışım hazırlanmıştır.

3.2.4. Numunelerin üretimi

Agrega olarak 0-1 mm ve 1-3 mm tane boyutlarında kuvars kumu kullanılmıştır. Lifli beton içeriğinde sika PPM-12 polipropilene mikro lif bir metreküpte 1200 gram olacak şekilde eklenmiştir. Ayrıca lif miktarları harç karışımlarına ağırlıkça eklenmiştir. Çimento esaslı harcın karışımına ait miktarlar Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. 1 m^3 Çimento esaslı harcın karışım miktarları

Seri	Portland Çimento (kg)	YFC (kg)	UK kg	SD kg	Kum (1) kg	Kum (2) kg	Su / Bağlayıcı	Sentetik Lif (SL) kg	Çelik Lif (ÇL) kg
K	320	250	310	62	477,5	477,5	0,49	-	-
ÇL	320	250	310	62	465	465	0,49	-	25
SL	320	250	310	62	477,5	477,5	0,49	1,2	-

Çalışmada 3B yazıcı ile Fluorite kafes yapıları ve Gyroid kafes yapıları kullanılarak, 70x70x270 mm boyutlarında prizma kiriş numuneler ve 70x70x70 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir (Resim 3.2). Her numuneden üç adet olmak üzere 42 adet küp, 21 adet kiriş numune üretilmiştir. Üretilen bu kafes yapılar, hazırlanan kalıplara yerleştirilmiş ve üzeri çimento bağlayıcılı farklı karışımlarla üretilen çimento esaslı harç ile doldurulmuştur. Kafesin yoğunluğundan dolayı dışarı çıkmasını önlemek için gerekli önlemler alınmıştır. Hazırlanıp kalıplara dökülen numuneler 24 saat boyunca kalıpta nemli bez altında bekletilmiştir. Numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılmış 20 ± 2 °C de 28 gün suda kür edilmiştir.



Resim 3.2. Gyroid ve fluorite kafes yapılı numunelerin kalıplara yerleştirilmesi

Hazırlanan numuneler üzerinde basınç, eğilme ve darbe deneyleri yapılmıştır. Her test için üç farklı numune deneye tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçların ortalama değerleri alınmıştır. Mekanik testler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne ait beton laboratuvarlarında yapılmıştır.

3.2.5. Basınç dayanımı deneyi

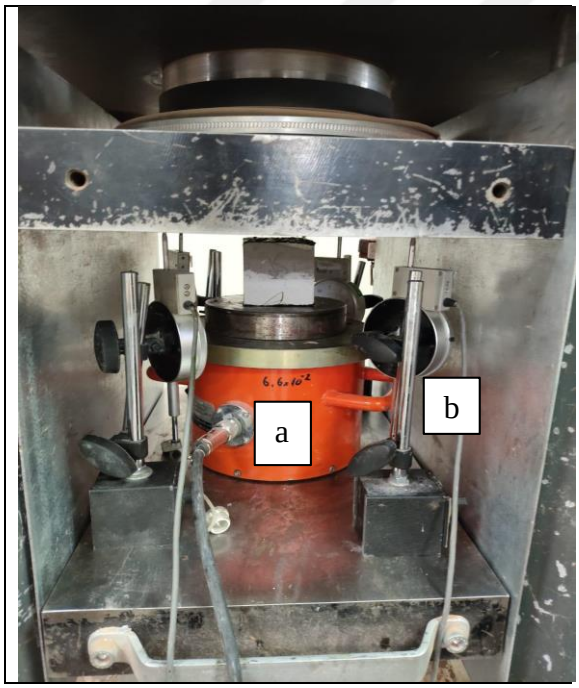
Kür havuzunda 28 gün bekletilen numuneler 28. günün sonunda kür havuzundan çıkarılmıştır. Bir gün kuru ortamda bekletilen numuneler basınç dayanımı testine hazır hale getirilmiştir. 28. Günün sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler TS EN 12390-3 standardına göre 0,6 ± 0,2 MPa/s yükleme hızı uygulanarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Deney esnasında uygulanan yük değerleri numune altı ve yükleme plakası arasına yerleştirilen bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Ölçülen yük değerleri numune alanına bölünerek gerilme değerleri elde edilmiştir (Eş.3.1). Yükleme esnasında oluşan kısalma değerleri ise alt ve üst yükleme plakaları arasına dört köşede yerleştirilen deplasman ölçerler ile ölçülmüştür. Dört deplasman ölçerden alınan verilerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama deplasman (kısalma) değeri hesaplanmıştır. Ortalama deplasman değeri numune boyuna bölünerek birim şekil değiştirme değerleri bulunmuştur. Ayrıca numune ile basınç tablaları

arasında oluşacak sürtünmeyi önlemek için numune yüzeyleri silikon bazlı gres yağı ile yağlanmıştır. Saf malzeme davranışının gözlenmesi için bu bölgelerde oluşacak sürtünme kuvvetinin etkisinin azaltılması gerekmektedir (Ateş, Khoshkholghi, Tore, Marasli ve Ilki, 2019). Resim 3.3'te basınç dayanım düzeneği verilmiştir. Basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde aynı konfigürasyon için test edilen numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Ortalama eğriler elde edilirken aynı şekil değiştirme değerine karşı gelen gerilme değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak şekil değiştirme değeri için ortalama gerilme değeri hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{3.1}$$

Eşitlik 3.1'de:

f_c = Gerilme (MPa);
F: Deney esnasında uygulanan kuvvet (N);
A_C: Numunenin kesit alanını (mm^2) göstermektedir.



Resim 3.3. Basınç dayanım deney düzeneği (a) yük hücresi (b) lvdt

3.2.6. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyi, betonun çekme etkisi altındaki dayanımını dolaylı olarak belirlemek için kullanılır. Eğilme dayanımı için orta noktadan yükleme testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı Eşitlik 3.2 yardımı ile bulunmuştur.

$$f_t = \frac{3.P.L}{2.b.d^2} \tag{3.2}$$

Eşitlik 3.2.'de;

f_t: $eğilme\ dayanımı\ (MPa)$
P = Kırılma anındaki maksimum yük (N)
L = Destekler arası açıklık (mm)
b = Numune genişliği (mm)
d = Numune yüksekliği (mm) ni göstermektedir.



Resim 3.4. Eğilme deneyi test cihazı

Eğilme deneyi deney düzeneği Resim 3.4'te gösterilmiştir. Eğilme deneyi öncesinde numune üzerinde deplasman ölçerlerin temas edecekleri noktalara cam parçalar yapıştırılmıştır. Deplasman ölçümü amacıyla numunenin mesnet bölgesine iki adet, açıklık ortasında ise bir adet deplasman ölçer yapıştırılan camlara basacak şekilde yerleştirilmiştir. Mesnet bölgesine yerleştirilen deplasman ölçerler deney esnasında oluşabilecek mesnet bölgesindeki yer değiştirmeleri ölçmekte olup, bu iki deplasman ölçerden alınan verilerin ortalaması açıklık ortasında ölçülen yer değiştirme

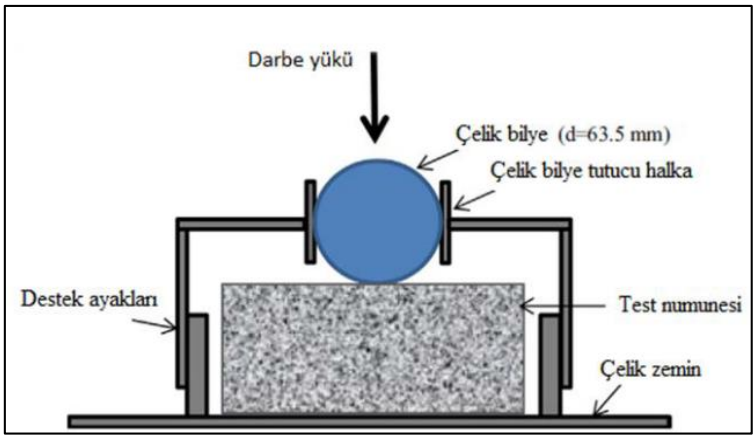
değerinden çıkarılarak numune ortasının net yer değiştirmesi elde edilmiştir. Deney esnasında yapılan yükleme monotonik sartan karakteristikte olup uygulanan yük değerleri test çerçevesi ve numune üst yüzeyi arasına yerleştirilen yük hücresi ile ölçülmüştür. Yük hücresinden ve deplasman ölçerlerden alınan veriler bir veri toplayıcı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesine benzer şekilde aynı konfigürasyon için test edilen numunelerin ortalama gerilme-deplasman eğrileri kullanılmıştır. Ortalama eğriler elde edilirken aynı deplasman değerine karşı gelen gerilme değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak deplasman değeri için ortalama gerilme değeri hesaplanmıştır.

Tokluk enerji yutma kapasitesi olarak isimlendirilmektedir. Betonun yük altında sönümleyebileceği enerji olarak tanımlanmaktadır. Gerilme–şekil değiştirme grafiği altında kalan alan olarak hesaplanmaktadır. Tokluk, betonun içindeki lif varlığına ve oranına göre değişkenlik göstermektedir. Lifin yapısı kuvvet aktarımı beton içindeki lif görünürlüğü enerjiyi değiştirmektedir. Çelik lifler için kuvvet aldıktan sonra her bir lifin şekil değişimine uğraması enerji yutma kapasitesini arttırmaktadır. Çatlak genişliği olarak düşünüldüğünde bir lifin kopması sonrasında bir sonraki life geçen kuvvet aktarımı liften life kuvvet geçişi olarak tanımlanmaktadır. Çelik liflerin ampirik bir formülle beton içerisindeki tanımı ve isimlendirilmesi tokluk indeksi olarak isimlendirilmektedir (Barr, Liu ve Dowers, 1982). Tokluk indeksi tanımı çalışmamızda kafes yapıların yük aktarımı için model oluşturmaktadır. Kafes yapılarının tokluk artışına verdiği katkı farklı tanımlamaların ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Çalışmamızda tokluk hesabı için excel ve matlab programları kullanılmış olup gerilme- şekil değiştirme grafikleri altında kalan alanlar bu programlar kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.7. Darbe dayanımı deneyi

Betonun darbe dayanımı numunelerin belirli bir yük altında ne kadar dayanıklı olduğunu ölçmeyi amaçlar. Bu çalışmada üretilen numunelerin darbe dayanımlarının belirlenebilmesi için ACI-544 standardına göre modifiye edilen çarpma test düzeneği kullanılmıştır (American Concrete Institute-544.2R-89). Test düzeneği Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Darbe deneyi test cihazı

Darbe Test deney cihazının özellikleri; üst kısımda görülen kürenin ağırlığı (4,45 kg), test numunesine serbest düşüş ile darbe uygulayıp, numunenin darbe dayanımını ölçer. Ağırlık belirli bir yükseklikten (457 mm) serbest bırakılarak hazırlanan numuneye darbe uygulanır. Şekil 3.2'de yer alan çelik bilye, darbe uygulamak için kullanılır. Darbe uygulamak için kullanılan çelik bilyenin çapı 63,5 mm'dir. Bu bilye, darbenin uygulandığı yüzeyin özelliklerine göre enerji transferini optimize eder. Yapılan çalışmada numunelerin darbe enerjisi değerleri "Eş. 3.3" e göre hesaplanmıştır.

$$EI = N \times m \times g \times h \quad (3.3)$$

Eşitilik 3.3'te:

EI = Darbe enerjisi (J)
N vuruş sayısı
(m) düşen kütle
(g) yer çekimi ivmesi
(h) ise yükseklik olarak belirtilmiştir (ACI 544.2R-89)

3.2.8. İçyapı görüntüleri

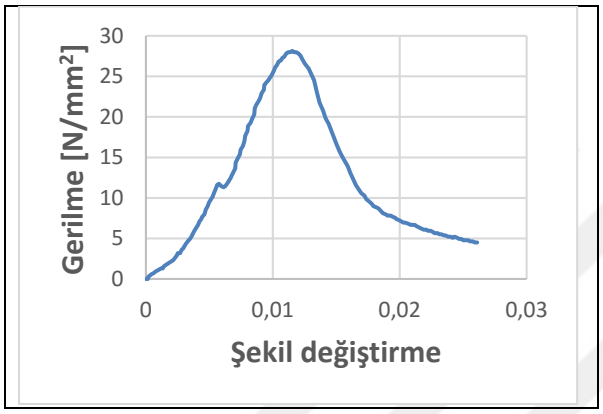
Aderans, beton yüzeyi ile donatı arasındaki fiziksel ve mekaniksel bağlantı olarak tanımlanmaktadır (Karakoç, 1985). Çalışmada harç numunelerinin kesimleri sulu kesim elmas uçlu testere ile yapılmıştır. Kesim işlemi yapılan numunelerin kafes yapısının harç ile aderansını incelemek için numunelerin kesit görüntüsü yüksek çözünürlüklü dijital fotoğraf

makinası ile alınmıştır. Çekimler sırasında tripot kullanılmış olup makine hareket etmeden aynı uzaklıktan fotoğraflar çekilmiştir. Kafes yapılarının harç ile yaptığı aderans incelenmiştir (Taşkan, Gündüz ve Şahin, 2019).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

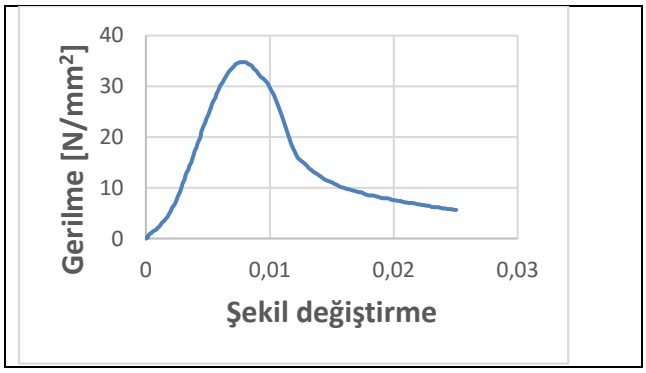
Kontrol (K), çelik lif (ÇL), sentetik lif (SL), TPU Fluorite (TF), TPU Gyroid (TG), PETG Fluorite (PF) ve PETG Gyroid (PG) numunelerine ait basınç dayanımı sonrasında elde edilen ortalama gerilme–şekil değiştirme ilişkileri Şekil 4.1- 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kontrol (K) numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği

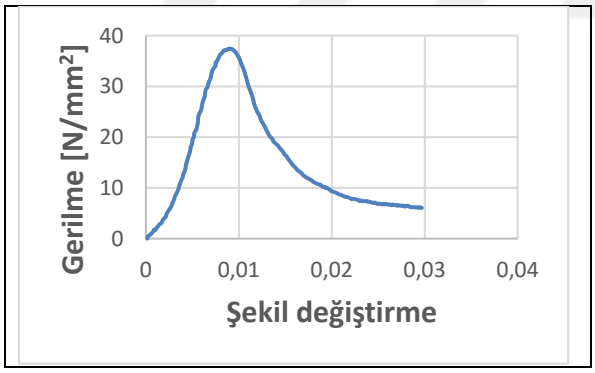
Lif katkısı içermeyen kontrol harç numunesinin basınç altındaki ortalama gerilme–şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.1'de verilmiştir. Grafikte yaklaşık 0.0115 birim şekil değiştirme seviyesinde maksimum gerilme değerine ulaşılmıştır. Bu noktada elde edilen 28.1 N/mm² değerindeki basınç gerilmesi, numunenin maksimum yük taşıma kapasitesini temsil etmektedir. Bu değerden sonra grafikte bir düşüş görülmekte, bu da betonun ezilme davranışını ve çatlak ilerlemesini açıkça göstermektedir. Tepe noktasının ardından %15'lik yük düşüşüne karşılık gelen şekil değiştirme hesaplanmıştır. Şekil değiştirme değeri 0,01343 olarak bulunmuştur.

Lif katkısının bulunmadığı durumlarda, harç çatlama sonrası esneklik göstermediğini ve yük kaybının oldukça hızlı gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Lifli karışımlarla karşılaştırıldığında, bu davranış çatlak sonrası enerji sönümleme kapasitesinin oldukça düşük olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.2. Çelik lifli (ÇL) numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği

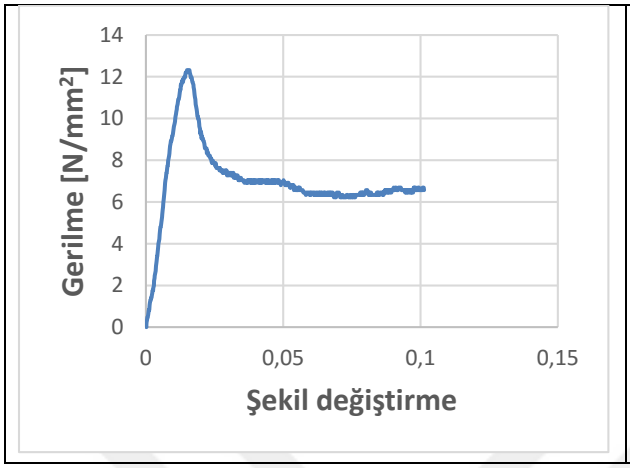
Çelik lif katkılı numunenin ortalama gerilme–şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.2'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde tepe noktası gerilmesinin 34.7 N/mm² olduğu görülmektedir. Ayrıca tepe yükün %15'lik azalması sonucunda oluşan şekil değişimi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer 0,0100 olarak belirlenmiştir. Çelik liflerin çatlak ilerlemesini kontrol altına alma etkisi, malzemenin dayanımı ve enerji sönümleme kapasitesini de arttırmaktadır. Bu davranış literatürde de gözlenmektedir (Taşkan ve diğerleri, 2019).



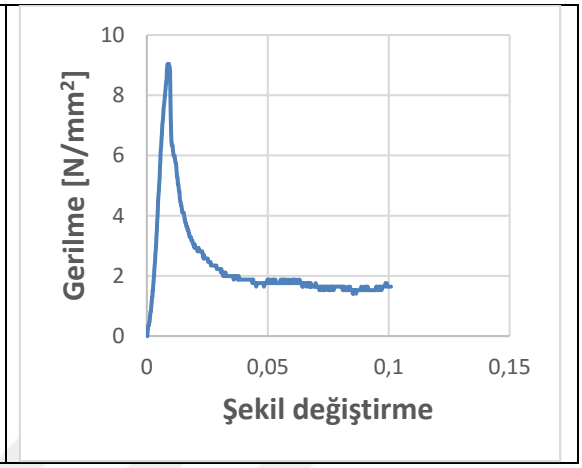
Şekil 4.3. Sentetik lifli (SL) numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği

Sentetik lif katkılı numunenin ortalama gerilme–şekil değiştirme grafiği Şekil 4.3' te verilmiştir. Grafik incelendiğinde tepe noktası gerilmesinin 37,4 N/mm² olduğu görülmektedir. Maksimum gerilme değerinin %15 azalması sırasında yaptığı şekil değiştirme hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değer 0,01076 olarak ölçülmektedir. Sentetik liflerin özellikle çatlak başlangıcını geciktirme ve mikro çatlakların ilerlemesini yavaşlatma etkisi davranışı göstermektedir (Karabulut, 2017). Bu numunelerde, tepe noktası gerilme değeri lifsiz numuneye ve çelik lifli numuneye göre hesaplanan değerler neticesinde artış

göstermiştir. Şekil değiştirme kapasitesi daha yüksek gözlenmiştir. Lifler, çatlaklar arasında köprüleme yaparak çatlak sonrası yük taşıma kapasitesini bir miktar korumuştur.



Şekil 4.4. TPU Fluorite numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.5. TPU Gyroid numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği

TPU Fluorite numunesi ortalama gerilme–şekil değiştirme grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde tepe noktası gerilmesinin 12,3 N/mm² olduğu görülmektedir. Maksimum gerilme değerinin %15 azalması sırasında yaptığı şekil değiştirme hesaplanmıştır. Bu değer 0,0184 olarak belirlenmiştir. TPU filamentin fluorite tipi iç yapı geometrisiyle kullanımı, harcın basınç altında sergilediği mekanik davranışta önemli değişikliklere neden olmuştur. Fluorite yapısı, düzenli ve tekrarlı bir geometrik örüntüye sahip olduğundan yüklerin iç yapıda dağılmasını sağlamaktadır. Grafikten de görüldüğü gibi, çatlak oluşumu sonrası yük taşıma kapasitesinin aniden düşmediği, kademeli bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Fluorite yapının iç boşluklu ve enerji sönümleyici yapısı sayesinde, özellikle deplasman miktarı artmıştır. Bu durum hesaplanan değerlerle de ortaya çıkmıştır. TPU'nun esnek bir filament olması nedeni ile çatlak köprüleme etkisi birleşerek, numuneye esneklik kazandırmıştır. Tepe noktasının yarısında bulunan gerilme değerinde grafiğin yatay ilerlemesi dikkat çekicidir. Kafes yapısının çalıştığını kanıtlamaktadır.

TPU Gyroid numunesinin ortalama gerilme–şekil değiştirme grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Gyroid, sürekli kıvrımlı bir yüzeyden oluşan ve boşlukların mekânsal olarak daha düzensiz dağıldığı bir geometriye sahiptir. TPU filamentin bu yapı içinde kullanılması, yük altında daha fazla şekil değiştirmeye izin veren, ancak tepe dayanımını sınırlayan bir davranış profili oluşturmuştur. Grafik incelendiğinde tepe noktasının gerilme değeri 9 N/mm² olduğu görülmektedir. Maksimum yaptığı şekil değiştirme 0,0091 olarak hesaplanmıştır.

Maksimum gerilme değerinin %15 azalması sırasında yaptığı şekil değiştirme hesaplanmıştır. Bu değer 0,009743 olarak belirlenmiştir. Gyroid yapı; numunenin iç boşluk hacmini arttırmaktadır, bu da numunenin toplam basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur.

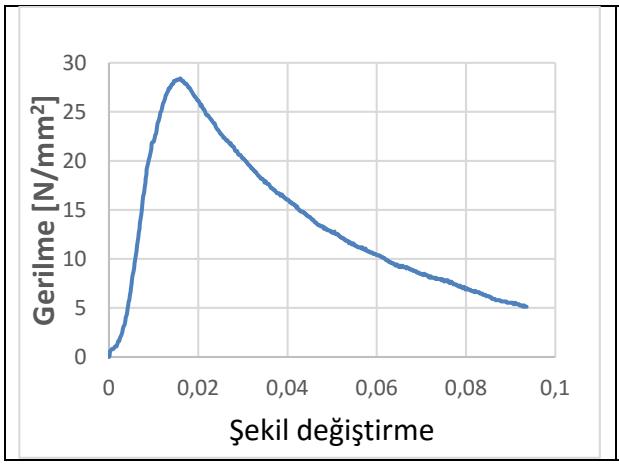
İki kafes yapısını karşılaştırılmasıyla oluşan veriler Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Çizelgelerde verilen yüksek, orta, düşük gibi kavramlar iki grubun kendi içindeki özelliklerini tanımlamaları için kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Tpu filament kullanılan kafes modellerinin karşılaştırması

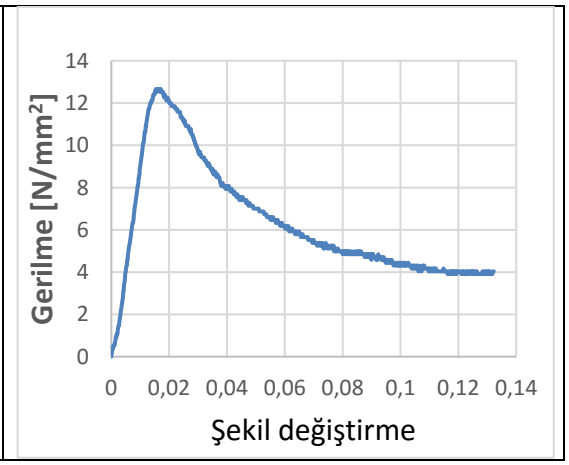
Özellik	TPU- Fluorite Yapı	TPU- Gyroid Yapı
Tepe Gerilme Dayanımı	Yüksek	Orta–Düşük
Şekil Değiştirme Kapasitesi	Yüksek	Yüksek
Çatlak Sonrası Yük Taşıma	Devam ediyor	Dalgalı – Yeniden yük alma
Sünek Davranış	Güçlü	Güçlü
Enerji Emme (Tokluk)	Yüksek	Yüksek
Geometri Etkisi	Homojen dağılım	Düzensiz, karmaşık

TPU filamentli yapılar, özellikle farklı 3B iç geometriler kullanıldığında betonun davranışını değiştirmektedir. Fluorite yapılar daha güçlü ve dengeli taşıyıcı sistemler sunarken, Gyroid yapılar ise enerji sönümleme kabiliyeti yüksek, deformasyonu tolere eden sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Farklı iç yapı geometrisine sahip PETG fluorid ve PETG gyroid numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.6. PETG Fluorite numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4.7. PETG gyroid numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiği

Şekil 4.6 incelendiğinde tepe noktasının gerilme değerinin 28,4 N/mm² olduğu görülmektedir. Maksimum yaptığı şekil değiştirme 0,0935 olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerinin %15 azalması sırasında yaptığı şekil değiştirme hesaplanmıştır. Bu değer 0,023 olarak belirlenmiştir. Tepe dayanımı, PETG filamentli lifsiz karışımlara göre belirgin şekilde artmıştır. PETG filamentin basım sonrasında gevrek davranış sergilemesi dayanımı arttırmıştır. Hesaplanan değerler şekil değişiminin diğer numunelere göre yüksek olduğunu göstermektedir.

PETG Gyroid numunesinin ortalama gerilme–şekil değiştirme grafiği (Şekil 4.7) incelendiğinde tepe noktasının gerilme değeri 12,6 N/mm² olduğu görülmektedir. Maksimum yaptığı şekil değiştirme 0,1322 olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerinin %15 azalması sırasında yaptığı şekil değiştirme hesaplanmıştır. Bu değer 0,0275 olarak belirlenmiştir. Hesaplanan değerler şekil değişiminin diğer numunelere göre yüksek olduğunu göstermektedir. PETG filamentli numune, daha organik ve düzensiz bir iç geometriye sahiptir. Bu yapı basınç dayanımında düşüşlere neden olmaktadır. PETG Gyroid numunenin tepe dayanımı, fluorite yapı kadar yüksek değildir. Gyroid yapı nedeniyle yüklerin bazı bölgelerde lokal yoğunlaştığı ve bu alanlarda erken çatlakların oluştuğu gözlenmiştir.

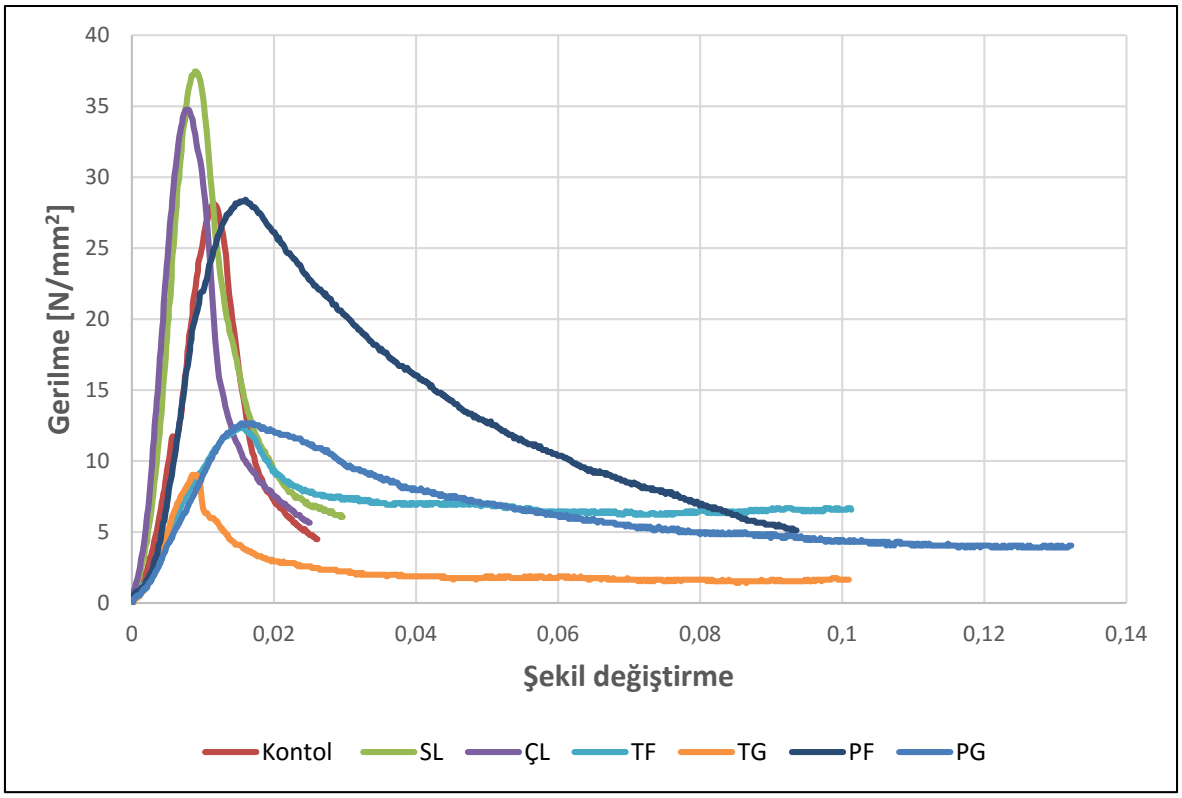
İki farklı kafes yapısının karşılaştırılması Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PETG filament kullanılan kafes modellerinin karşılaştırması

Özellik	PETG – Fluorite Yapı	PETG – Gyroid Yapı
Tepe Basınç Dayanımı	Yüksek	Orta
Şekil Değiştirme Kapasitesi	Orta	Yüksek
Çatlak Sonrası Davranış	Kademeli düşüş	Yeniden yük alma eğilimi
Sünek Davranış	Güçlü	Çok güçlü
Enerji Emme (Tokluk)	Yüksek	Yüksek
Yapı Stabilitesi	Yüksek	Düşük–Orta
Uygulama Önerisi	Taşıyıcı sistemler	Darbe ve enerji sönümleyici sistemler

Basınç deneyi sonuçlarına bakıldığında PETG filamentli numunelerin üretimi sırasında üç boyutlu yazıcıdan çıkan filament kırılgan ve sert bir malzemeye dönüşmektedir. Bu dönüşüm kafes yapılarının performansını etkilemektedir. Fluorite kafes grafiğine bakıldığında tepe noktasının kontrol numunesine benzer performans sergilediği gözlenmektedir. Gyroid yapısı diğer filament ile üretilmiş numuneye göre daha düşük bir tepe noktası sergilemiştir.

Deneye tabi tutulan numunelerin gerilme – şekil değiştirme karşılaştırma grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlara göre kafes yapılı numunelerin özellikle kuvvet düşmesi sonrasında yüklemeden önceki şekline geri dönmeye çalıştığı gözlenmiştir. Bazı numunelerin yaptığı deplasmanı geri alması izlenmiştir. Bu durum kafes yapısının kırılsa da numuneyi bir arada tutmaya devam ettiğinin göstergesidir.



Şekil 4.8. Numunelerin ortalama gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Basınç deneyine tabi tutulan kontrol, Çelik lifli, TPU gyroid, TPU fluorite numunelerin deney sonrası görüntüleri Resim 4.1'de verilmiştir.



Resim 4.1. Harç numunelerin kırılma sonrası görüntüleri (a) Kontrol (K), (b) Çelik lif (ÇL), (c) TPU Gyroid (TG), (d) TPU Fluorite (TF)

Çimento esaslı lifsiz harç Resim 4.1a'da gösterilmektedir. Basınç altında ani ve gevrek kırılma gözlenmiştir. Numune, minimum şekil değiştirme sergileyerek dağılmıştır. Çimento esaslı lifsiz harçlarda, kırılma enerjisini absorbe etme kapasitesi düşük olduğu için yük altında çatlama aniden meydana gelmiş ve gevrek bir kırılma oluşmuştur. Çatlaklar boyunca düzgün ve dikey yönlü ayrılmalar görülmektedir, bu durum düşük süneklik ve zayıf çatlak kontrolü ile ilişkilidir. Resim 4.1b'de Çelik Lif (ÇL): Sentetik veya çelik lif katkısı içeren bu numunelerde, çatlak ilerlemesinin lifler tarafından kısmen sınırlandığı gözlenmiştir. Lifler çatlaklar arasında köprüleme etkisi yapmaktadır. Lifli yapı daha kontrollü bir kırılma şekli sunmaktadır. Ayrıca kuvvet yönüne paralel gerçekleşen çatlaklar Resim 4.1b'de test esnasında görüntülenmiştir.

Resim 4.1c'de görüldüğü gibi Gyroid yapılı numuneler; TPU ya da PETG filament ile üretilmiş ve gyroid iç geometriye sahip olan bu numunelerde, kırılmalar daha düzensiz bir yapıda gelişmiştir. Gyroid yapının boşluklu ve sürekli kıvrımlı yapısı nedeniyle yük yoğunlaşmaları bazı bölgelerde erken kırılmalara neden olmuş, ancak filamentin esnekliği nedeniyle kırılma sonrası parçalanma sınırlandırılmıştır.

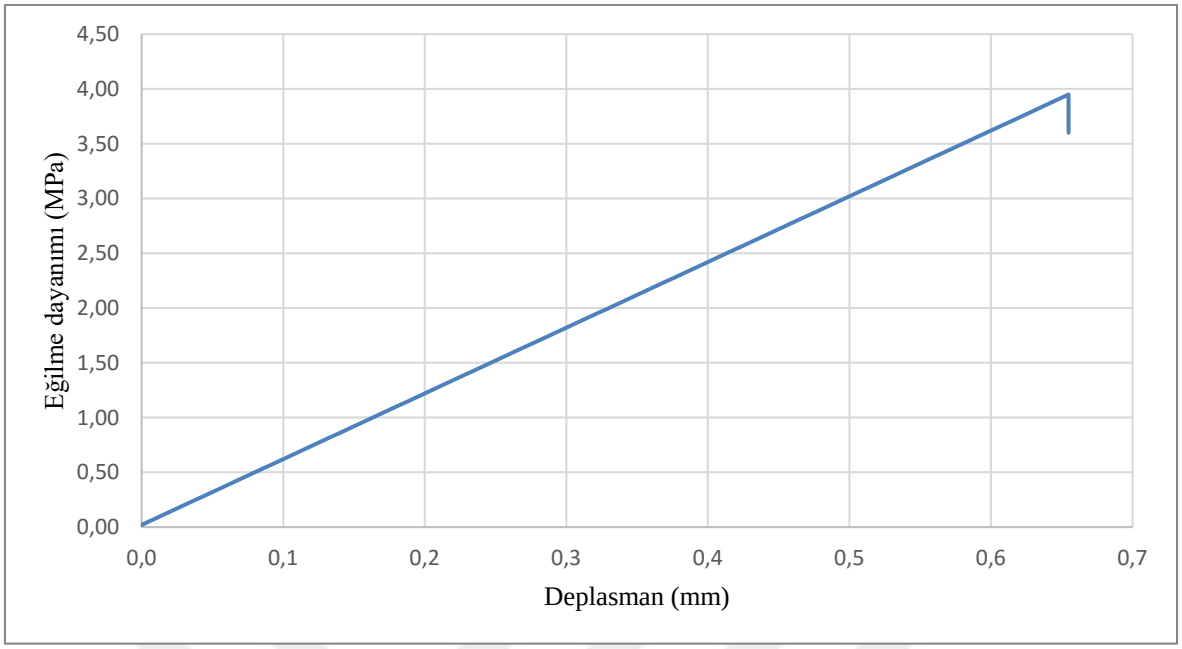
Resim 4.1d'de görüldüğü gibi Fluorite Yapılı Numuneler; Fluorite tipi düzenli iç yapıya sahip numuneler, kırılma sonrası daha çoklu bir çatlak yayılımı göstermiştir. Yapı içinde yükler daha homojen dağıldığı için kırılmalar genellikle merkezi bölgede yoğunlaşmıştır. Bu durum, yük taşıma kapasitesinin daha iyi korunmasına ve tok davranışın ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Resim 4.1c ve 4.1d'de görüldüğü gibi kafes yapıların kalıp içerisinde kapladığı belirli bir hacim vardır. Kaplanan hacimden dolayı Fluorite ve Gyroid kafes yapılı modellerde numunelerin içerisinde bulunan çimento esaslı harç miktarı diğer numunelere göre daha azdır. Ancak bu kafes yapıların içerisinde çimento esaslı harcın hacmi daha az olsa da resim 4.1c ve 4.1d'den de görüldüğü gibi numuneler dağılmamış ve hacim stabilitesini koruduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, Gyroid ve Fluorite kafes yapılı numunelerin basınç dayanımı sonrası parçalanması veya güç tükenmesi daha sünek olarak meydana gelmiştir.

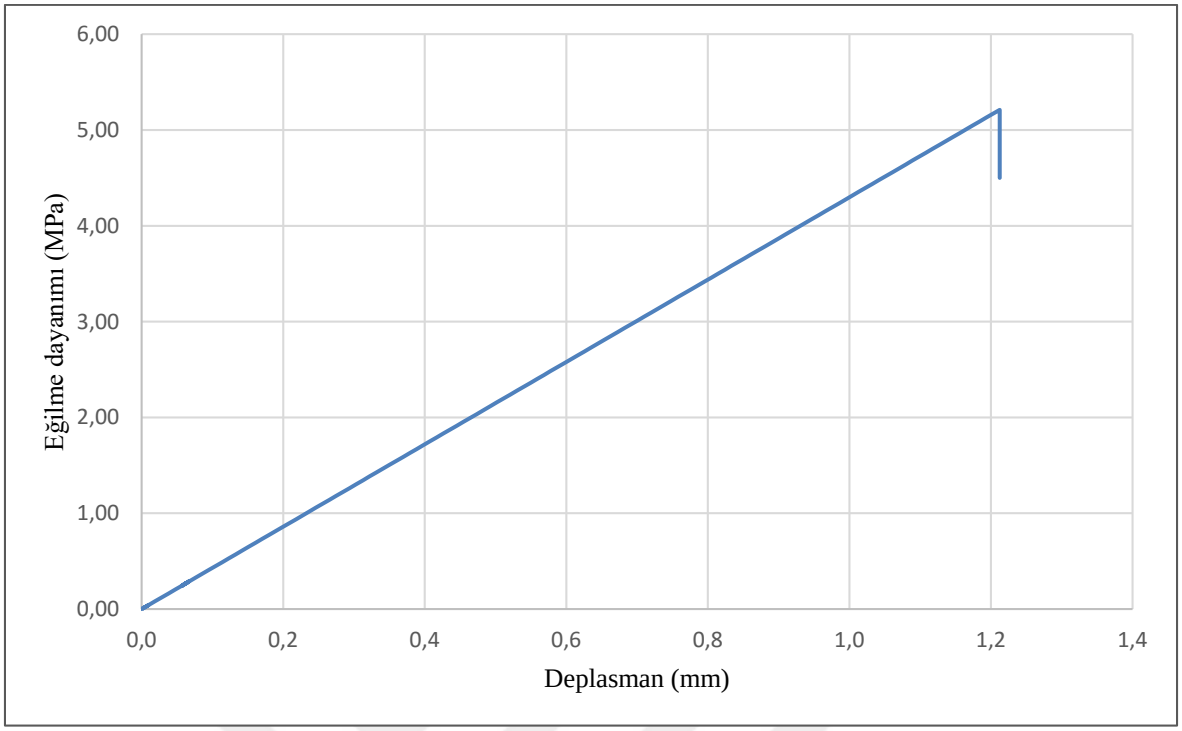
4.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan kontrol (K), çelik lif (ÇL), sentetik lif (SL), TPU Fluorite (TF), TPU Gyroid (TG), PETG Fluorite (PF) ve PETG Gyroid (PG) numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafikleri Şekil 4.9- 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kontrol (K) numunelerine ait ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

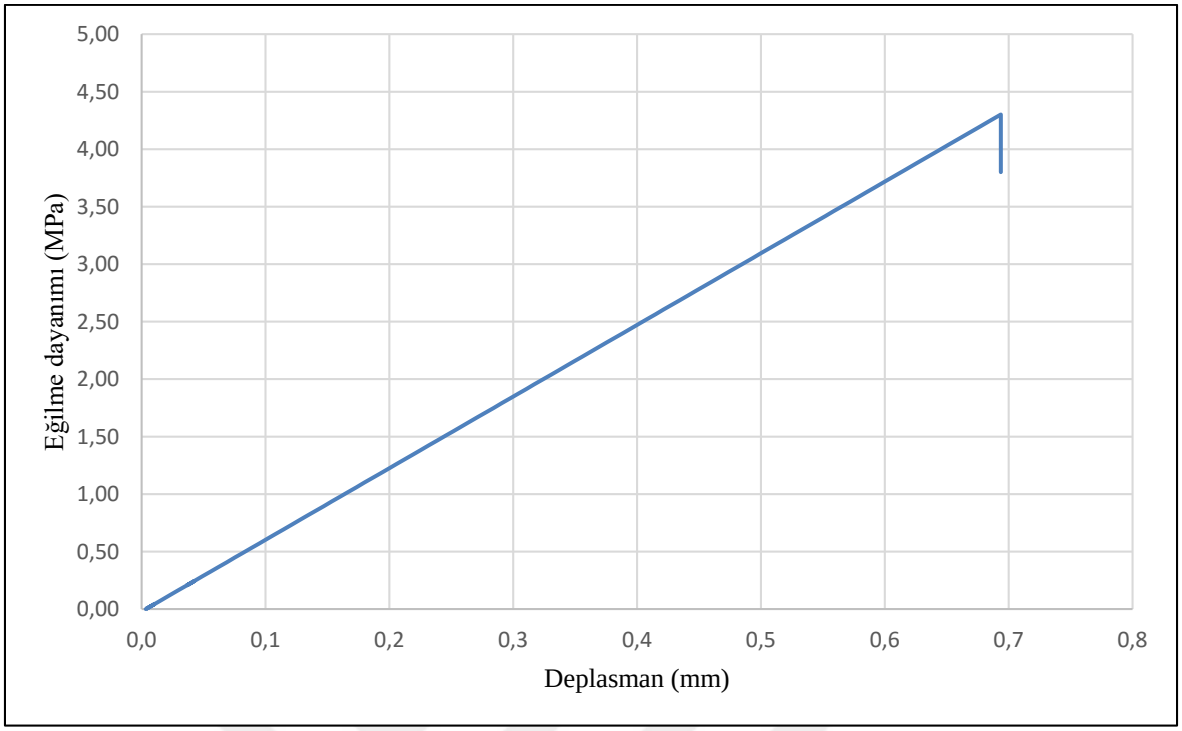
Kontrol numunesine ait ortalama Eğilme dayanımı- deplasman ilişkisi Şekil 4.9'da verilmiştir. Numune davranışında belirgin gevrek kırılma özellikleri gözlemlenmiştir. Numune, düşük deformasyonla birlikte ani kırılma eğilimi göstermiştir. Eğilme yükü altında çatlak oluşumu sonrası yük taşıma kapasitesi hızlı bir şekilde azalmıştır. Eğilme dayanımı-deplasman ilişkisinde tipik olarak tek tepe noktası ve sonrasında ani düşüş gözlenmiştir. Lif içermeyen kontrol numuneleri, betonun klasik gevrek karakteristiğini yansıtarak çatlağa kadar doğrusala yakın, çatlak sonrası ise yük taşıma kapasitesini hızla kaybeden bir davranış sergilemiştir. Tokluk açısından düşük performans göstermiştir. Hesaplanan değer Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Çelik lifli (ÇL) numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

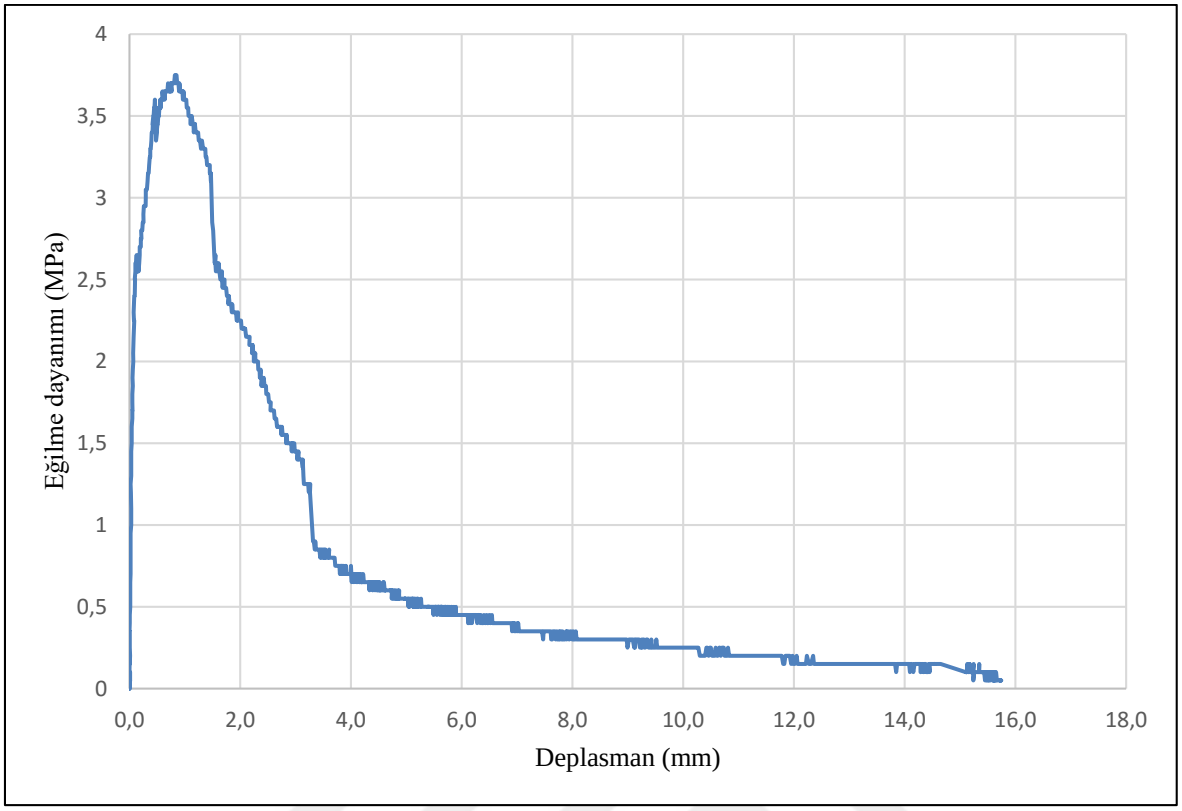
Çelik lif katkılı numunenin ortalama eğilme dayanımı-deplasman ilişkisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzerine çelik lif katkısı ile eğilme dayanımı değeri kontrol harcına göre artmıştır. Ayrıca eğilme dayanımına karşılık gelen deplasman değeri de kontrol harcına göre artmıştır. Deplasman değerinin kontrol harç değerinin yaklaşık iki katı seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Tokluk değeri de kontrol numunelerine göre belirgin şekilde artmıştır, bu da numunenin daha fazla enerji sönümleyebildiğini göstermektedir. Çizelge 4.4'te tokluk değerleri kıyaslanmaktadır.

Sentetik lifli ve PETG Gyroid numunelerine ilişkin eğilme dayanım- deplasman ilişkileri sırası ile Şekil 4.11 ve 4.12'de, aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.11. Sentetik lifli (SL) numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

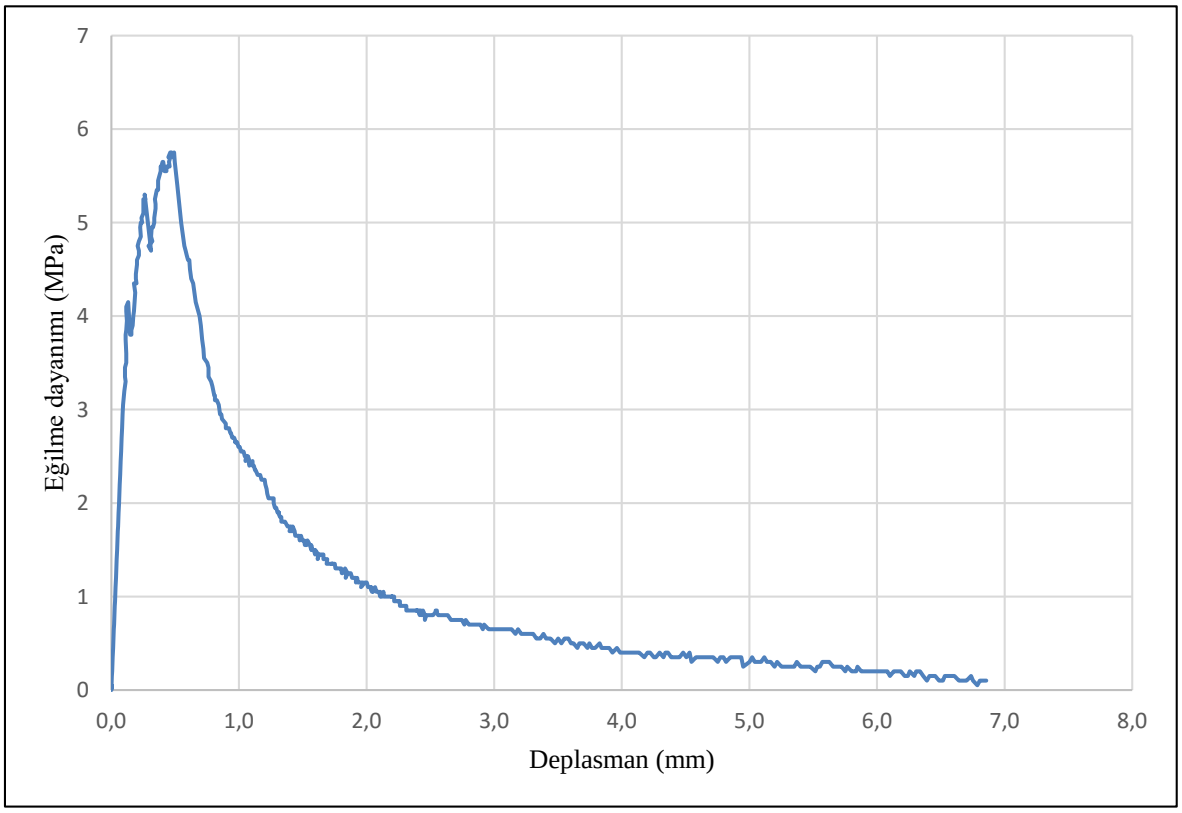
Sentetik lif katkılı numunenin Eğilme dayanımı-deplasman ilişkisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Lif katkısının olduğu numunelerin eğilme dayanımları ve eğilme dayanımına karşılık gelen deplasman değerleri çelik lifli numuneden düşük, kontrol numunesinden daha yüksektir. Başka bir deyişle kontrol numunesine göre kıyaslandığında eğilme dayanımını arttırmıştır. Deplasman değerlerine bakıldığında Sentetik lif katkılı numunenin kontrol numunesinin değerine göre artış göstermektedir. Çelik lif sentetik liften daha fazla dayanım göstermiştir. Bu durum çelik liflerin çekme dayanımının sentetik liflere göre daha fazla olması şeklinde yorumlanır.



Şekil 4.12. PETG Gyroid (PG) numunelerin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

PETG filamentle üretilmiş Gyroid kafes içeren kompozit numunenin eğilme dayanımı-deplasman ilişkisi Şekil 4.12'de verilmiştir. Gyroid iç geometrisine sahip numunelerde, malzeme yapısı ve geometrik düzenin eğilme davranışı üzerinde önemli etkileri gözlemlenmiştir. Gyroid yapı, yapının bütününe esneklik kazandırmış ve yük altında daha geniş deformasyonlara izin veren bir davranış geliştirmiştir. PETG'nin plastik yapısı sayesinde, eğilme eğrisinde dayanımda düşüş olsada uzun deplasmanlarla ilerleyen bir enerji soğurması izlenmiştir. Ancak Gyroid yapının düzensizliği, yük altında bazı bölgelerde lokal gerilme birikimlerine yol açtığı deneyler esansında gözlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımında çelik lifli, sentetik lifli ve kontrol numunesine göre bir miktar düşüş gözlemlense de tokluk değeri bu numunelere göre önemli ölçüde artış göstermiştir (Çizelge 4.4.). Bunun sebebi güç tükenmesinin bu numuneler kadar ani meydana gelmemesi, eğilme dayanımı- deplasman ilişkisinin tepe noktasından sonra artan deplasmanlarla birlikte daha yavaş olarak azalmasıdır. Diğer bir deyişle çatlak sonrası eğilme eğrisinde belirgin kademeli bir düşüş ve uzun bir deformasyon aralığı izlenmiştir. Bu, yapının enerjiyi sönümleme kapasitesinin güçlü olduğunu göstermektedir. PETG + Gyroid konfigürasyonun, taşıyıcılığın ikinci planda olduğu ancak deformasyon kabiliyetinin ön planda olduğu uygulamalar için uygundur.

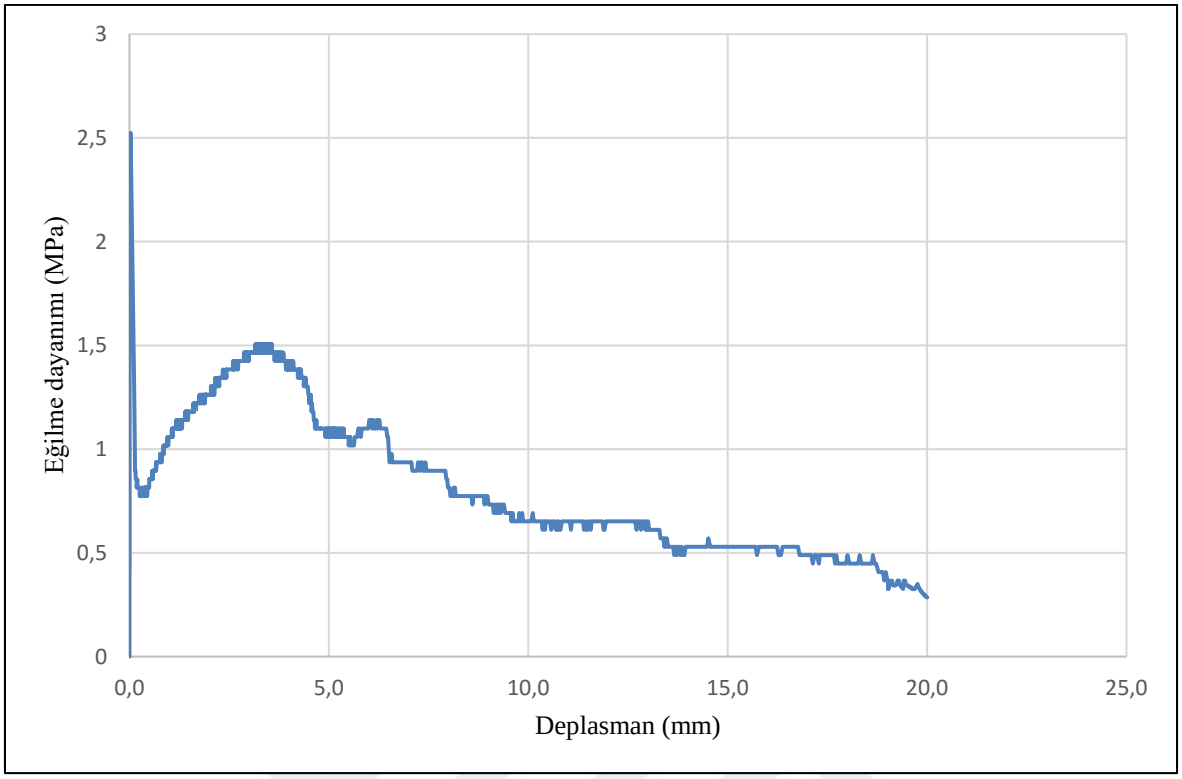
PETG Fluorite ve TPU Fluorite numunelerine ilişkin eğilme dayanım- deplasman ilişkisi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ‘te verilmiştir.



Şekil 4.13. PETG Fluorite (PF) numunelerin ortalama eğilme dayanımı-deplasman grafiği

PETG Fluorite numunesine ait eğilme dayanımı-deplasman ilişkisi Şekil 4.13’te verilmiştir. Numunenin davranışlarına bakıldığında kontrol numunesine benzer bir tepe noktası sergilemiştir. Bu durum PETG fluorite kafes yapısının eğilme dayanımına katkısını desteklemekte ayrıca şekil değişimi ise beklenildiği gibi davranışa katkı sağlamaktadır.

PETG filamentle oluşturulmuş Fluorite iç yapıya sahip numunelerde, yapı geometrisi ve malzeme özelliklerinin birlikte şekillendirdiği bir mekanik davranış gözlenmiştir. Fluorite yapının düzenli ve kapalı hücreli geometriye sahip olması, yük aktarımını daha dengeli hale getirmiştir. PETG malzemesinin nispeten gevrek yapısı nedeniyle, eğilme sırasında kademeli ama sınırlı deformasyon gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı- deplasman eğrisinde ilk yükselme sonrası yük kapasitesinde belirgin bir azalma, ardından ise düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Tokluk değeri, Gyroid yapıdan daha düşük olsa da Fluorite geometrisinin sunduğu daha iyi yük yayılımı, çatlak sonrası enerji sönümlemesine katkı sağlamıştır. Toplam deplasman kapasitesi, PETG’nin düşük esnekliği nedeniyle orta düzeyde kalmıştır.

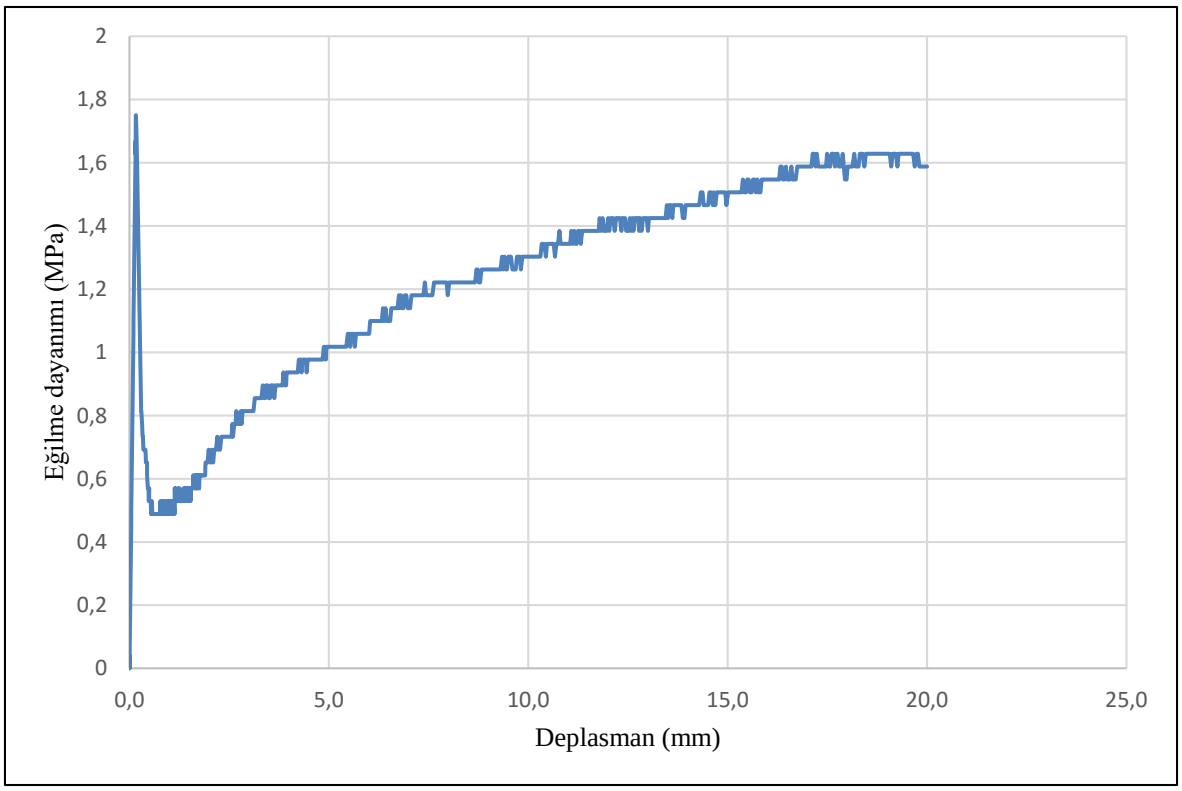


Şekil 4.14. TPU Fluorite (TF) numuneleri ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

TPU fluorite numunenin eğilme dayanımı- deplasman ilişkisi Şekil 4.14'te verilmiştir. TPU filament kullanılarak üretilen ve Fluorite iç geometrisine sahip numuneler, malzemenin yüksek esnekliği sayesinde farklı bir eğilme davranışı sergilemiştir. TPU'nun esnek yapısı, numunelere yüksek şekil değiştirme kabiliyeti kazandırmıştır. Eğilme dayanımı- deplasman grafiği numunenin, daha uzun bir deplasman aralığına yayılmasını ve yük altındaki deplasman davranışını açık bir şekilde göstermektedir. Fluorite yapının simetrik iç düzeni, yük altında şekil değiştirmeyi yönlendirmiş, bu sayede düzenli bir çatlak gelişimi ve deformasyonlar gözlenmiştir. Tokluk değeri oldukça yüksektir (Çizelge 4.4). TPU, çatlak sonrası dahi yük taşıma kapasitesini koruyabilmiştir. PETG'ye kıyasla eğilme dayanımı daha düşük olsa da tokluk ve deformasyon kapasitesi açık bir şekilde daha yüksektir. Çatlak oluştuğu anda eğilme dayanımı yaklaşık 2.5 MPa seviyesinde iken kafes yapısı bu kuvvet ile dayanıma katkı vermemektedir. Ancak nunune dayanımı 0.77 MPa seviyesine düştükten sonra kuvvet almaya başlamıştır. Bu durum TPU filamentin ani çekme dayanımının düşük olması şeklinde yorumlanmaktadır. Fluorite kafes yapısının yüksek dayanım alması sonrasında deplasmanı arttırması beklenen bir sonuç olmaktadır. Kafes yapısının beklenildiği gibi (Ashby, 2006) davranışı sergilemesi nispeten düşük bir düzeyde kalmıştır.

TPU + Fluorite yapı, eğilme altında yüksek deplasman, yüksek tokluk ve eğilme dayanımı sunmuştur. Bu tür yapılar, özellikle darbe emici veya enerji sönümleyici sistemlerde tercih edilebilir.

Şekil 4.15 TPU Gyroid numunelerine ilişkin eğilme dayanımı- deplasman ilişkisi değerlendirmesi aşağıda verilmiştir.



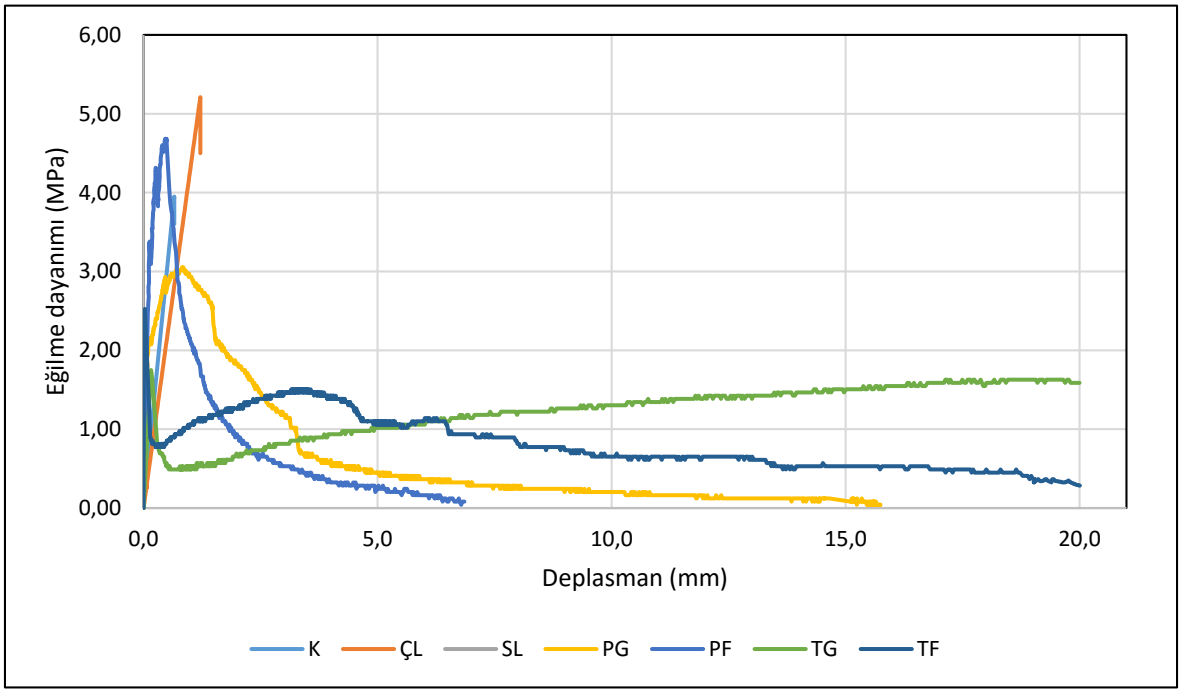
Şekil 4.15. TPU Gyroid (TG) numunelerinin ortalama eğilme dayanımı- deplasman grafiği

TPU Gyroid numunesi eğilme dayanımı-deplasman ilişkisi Şekil 4.15'te verilmiştir. TPU filamentle üretilmiş ve Gyroid iç yapıya sahip numunelerde yapılan eğilme deneyi sonuçları, malzemenin yüksek esnekliği ile karmaşık iç yapının birlikte oluşturduğu gelişmiş deformasyon ve tokluk davranışını ortaya koymuştur. Eğilme eğrisinde, ilk yüklenme aşamasında yavaş ve sürekli artan bir yük-deplasman ilişkisi izlenmiştir. İlk çatlak oluştuktan sonra dayanımda ani bir düşüş ortaya çıkmış ancak artan deplasman ile numune dayanımını yeniden kazanmaya başlamıştır. Dayanımdaki bu kazanım çatlak öncesi numune dayanımını ilerleyen deplasman ile yakalayacak düzeyde olmuştur. Tokluk değeri çok yüksek olup, yapı çatlak sonrası bile önemli miktarda enerji absorbe etmeye devam etmiştir. Benzer davranış Ashby (2006) tarafından da gözlenmiş olup dayanımdaki düşüşten sonra

yük taşıma kapasitesinin yeniden kazanılması ve yük taşıma kapasitesinin çatlak oluşmadan önceki yüke yaklaşması ise katılaşmaya örnek gösterilebilir.

Gyroid geometrisinde üretilmiş TPU yapılar, yüksek şekil değişimi ve yüksek enerji soğurma kapasitesi (tokluk) sunarak, eğilme altındaki performansta öne çıkmıştır. Ancak bu yapıların eğilme dayanımının PETG veya çelik lif katkılı numunelere kıyasla daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu, TPU filamentin daha esnek yapısından kaynaklanmaktadır. Eğilme dayanımı-deplasman eğrilerinde, ilk çatlak sonrası yük taşıma kapasitesinin uzun bir deplasman aralığı boyunca artarak devam ettiği, yapının kopmadan veya ani kırılmadan esnemeye devam ettiği açıkça görülmüştür. TPU filamentle üretilmiş Gyroid kafes yapısı (Ashby, 2006)'nın bahsettiği gibi tekrar yük alması ve bu durumun devam etmesi malzemenin içi yapıda sıkışarak daha yüksek dayanımların elde etmesi şeklinde yorumlanmaktadır. Burada eğilme deney cihazının yer değiştirme kapasitesinin yaklaşık 20 mm olduğu ve bu tip numunelerde bu sınıra ulaşıldıktan sonra yük artma eğilimi devam etse dahi deneyin sonlandırıldığı belirtilmedir.

Şekil 4.16'da eğilme deneyi karşılaştırma grafiği başlığı altında, deneysel çalışmalardan elde edilen eğilme dayanımı, şekil değiştirme verilerinin topluca değerlendirildiği karşılaştırmalı analiz sunulmuştur.



Şekil 4.16. Eğilme dayanımı- deplasman ilişkileri karşılaştırma grafiği

Kontrol numunesi (K) en düşük eğilme dayanımı ve deformasyon kapasitesine sahiptir. Çelik lifli (ÇL) numuneler hem dayanımda hem de şekil değiştirmede belirgin artış göstermiştir. Sentetik lifli (SL) lifli numuneler, dayanımı çelik lif kadar arttıramasa da şekil değiştirme ve tokluk değerlerini pozitif yönde etkilemiştir. PETG yapılar, gevrek davranmış olup bunların şekil değiştirme kapasiteleri sınırlı kalmıştır. Fluorite kafes, Gyroid kafese göre daha iyi yük dağılımı sağladığı için, PETG-Fluorite numuneleri PETG-Gyroid'e göre daha dengeli performans sergilemiştir. Karşılaştırma grafiğine bakıldığında kafes yapılarının oluşturduğu boşluk hacminden dolayı bir yük düşüşü beklenmiştir. Yük düşüşleri sonrasında (Ashby, 2006) bahsettiği gibi tekrar yük artışı ve deplasman değer artışı görülmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek dayanım beklendiği gibi çelik lifli numunede görülmüştür. En yüksek uzama TPU filamentlerde ve özelikle Gyroid kafes yapılarında gerçekleşmiştir.

TPU yapılar, PETG'ye kıyasla düşük eğilme dayanımına sahip olsa da yüksek süneklik ve tokluk ile öne çıkmıştır. Özellikle TPU-Gyroid, en yüksek deplasman kapasitesine ulaşmış, çatlak sonrası yük taşıma özelliği ile dikkat çekmiştir. Eğilme deneyi sonucunda tüm numunelerin kendi arasında özelliklerinin kıyaslanması Çizelge 4.3'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde; yüksek mukavemet istenen sistemlerde, çelik lif takviyesinin en etkili yöntem olduğu; Yüksek esneklik, deformasyon kapasitesi ve tokluk gereken uygulamalarda TPU + Gyroid en başarılı yapı olarak öne çıkmıştır. PETG + Fluorite, yük taşıma ve şekil değiştirme arasında dengeli bir performans sergilemiştir. Sentetik liflerin, performans açısından yapıya sınırlı ama faydalı katkılar sağladığı belirlenmiştir. Harç performansında içyapı geometrisinin etkisinin, lif katkısı kadar önemli olabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.3. Eğilme dayanımı deney sonuçlarının karşılaştırması

Numune	Eğilme Dayanımı	Deplasman Kapasitesi	Tokluk	Genel Performans Özeti
KH	Düşük	Çok düşük	Düşük	Standart harç, gevrek davranış
ÇL	Yüksek	Orta	Yüksek	Dayanımı ve enerji soğurumunu artırır
SL	Orta	Orta-Yüksek	Orta	Deplasman artışı
PETG-G	Orta	Düşük	Düşük	Gevrek yapı, kırılgan davranış
PETG-F	Orta-Yüksek	Orta	Orta	Dengeli ve stabil eğilme davranışı
TPU-G	Düşük	Çok yüksek	Çok yüksek	Yüksek süneklik, darbe emici potansiyel
TPU-F	Düşük-Orta	Yüksek	Yüksek	Esnek ve düzenli deformasyon

Numunelerin tokluk değerlerinin kontrol numunesinin tokluk değerine göre yüzdesel değişimi ise Çizelge 4.4'te verilmiştir. Tokluk değerleri hesaplanırken eğer daha önce göçme olmamış ise 20 mm deplasman sınırı nihai nokta olarak alınmıştır. Kontrol numunesi (lifsiz harç) için tokluk değeri en düşük olup, referans olarak %100 alınmıştır. Bu numunenin

davranışı, çatlak sonrası yük taşıma kapasitesinin neredeyse hiç olmadığını ve gevrek kırılma davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Çelik lif (ÇL) katkılı numunenin tokluk değeri, %145 artış göstermiştir. Sentetik lif katkılı (SL) numunenin tokluk değeri ise yaklaşık %15'lik bir artış gözlenmiştir. Bu durum, SL liflerin enerji sönümleme kabiliyetinin sınırlı olduğunu, ancak yine de çatlak kontrolüne katkı sunduğunu göstermektedir. PETG–Gyroid ve PETG–Fluorite yapılarla oluşturulan filament takviyeli numunelerde ise tokluk sırasıyla %743 ve %478 artmıştır. Bu sonuçlar, PETG filamentlerin gevrek olmasına rağmen iç geometrik yapısı sayesinde yük altında enerji yayılımını etkin biçimde yönlendirdiğini ve kırılma öncesi şekil değiştirme kapasitesini artırdığını göstermektedir. TPU–Fluorite numunesi ile tokluk %1210 seviyelerine çıkarken, TPU–Gyroid numunesi en yüksek artışı %1821 ile göstermiştir. Bu bulgu, TPU'nun elastik ve kopmaya karşı dirençli yapısıyla birlikte Gyroid geometrisinin enerji emici özelliğinin önemli bir etki yarattığını göstermektedir.

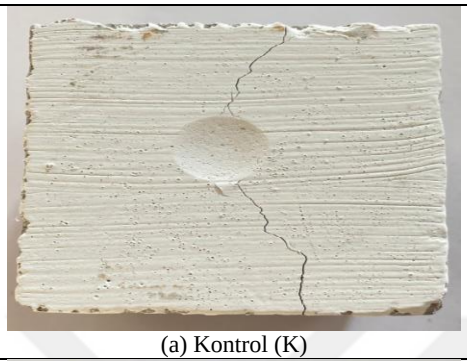
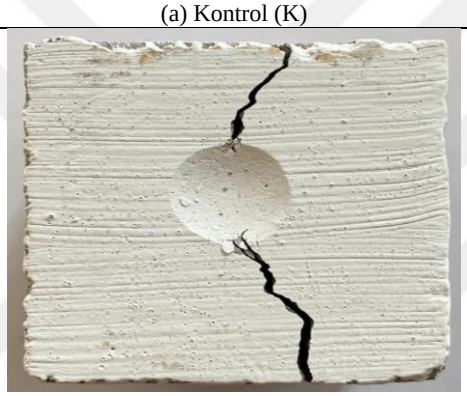
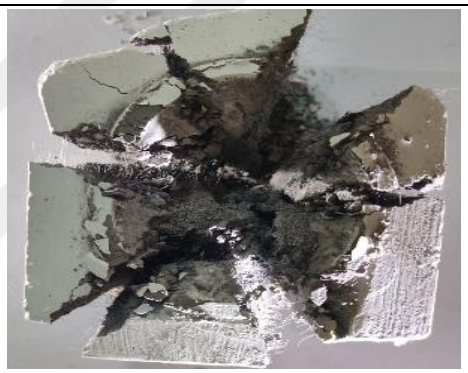
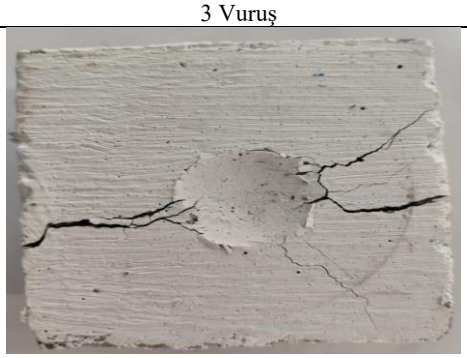
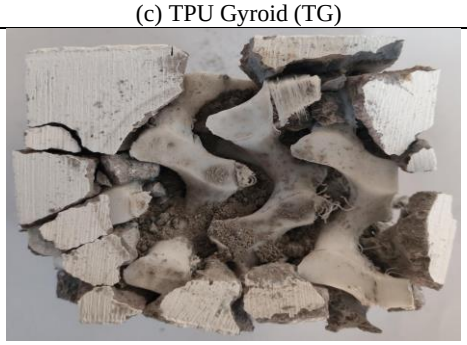
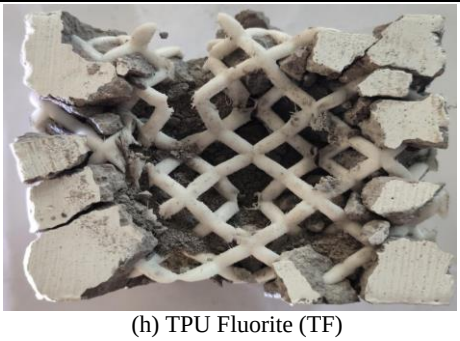
Çizelge 4.4. Numunelerin tokluk ve yüzdesel değişimi

	Tokluk	Yüzdesel değişim
Kontrol (K)	1,29	%0
Çelik lif (ÇL)	3,16	%144,96
Sentetik lif (SL)	1,48	%14,73
PETG Gyroid (PG)	10,88	%743,41
PETG Fluorite (PF)	7,46	%478,29
TPU Fluorite (TF)	16,90	%1210,07
TPU Gyroid (TG)	24,78	%1820,93

Çizelge 4.4 Genel olarak değerlendirildiğinde; lif katkısı, özellikle çelik lif için ciddi bir performans artışı sağlamış olsa da filament destekli yapıların, özellikle TPU içerenlerin, tokluk konusunda çok daha üstün performans gösterdiği belirlenmiştir. Gyroid tipi iç yapılar, yük dağılımını daha etkin şekilde yönlendirerek sünek davranışı arttırmıştır. TPU–Gyroid kombinasyonu, tokluk açısından en başarılı yapı olarak öne çıktığı ve enerji yutma kabiliyeti bakımından ileri mühendislik uygulamaları için oldukça uygun bir çözüm olduğu görülmektedir.

4.3. Darbe Dayanımı Deney Sonuçları

Darbe dayanımı deneyleri sonucunda Kontrol (K), sentetik lif (SL), TPU Gyroid (TG) ve TPU Fluorite (TF), numunelerine ait görseller Resim 4.2'de verilmiştir.

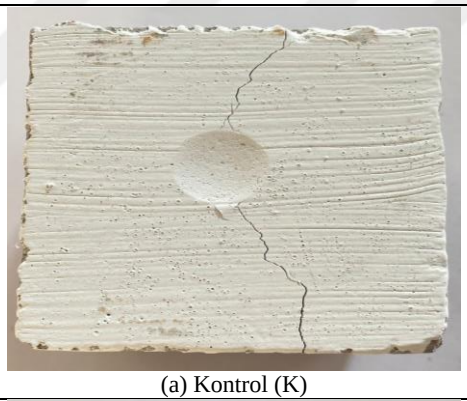
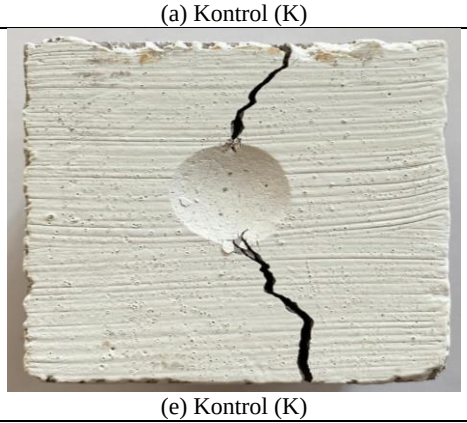
İlk Vuruş	 (a) Kontrol (K)	 (b) Sentetik Lifli (SL)
Nihai Vuruş	 (e) Kontrol (K)	 (f) Sentetik Lifli (SL)
Son vuruş	3 Vuruş	11 Vuruş
İlk Vuruş	 (c) TPU Gyroid (TG)	 (d) TPU Fluorite (TF)
Nihai Vuruş	 (g) TPU Gyroid (TG)	 (h) TPU Fluorite (TF)
Son vuruş	93 Vuruş	300 vuruş

Resim 4.2. Darbe deneyine sonuçlarınaait görseller

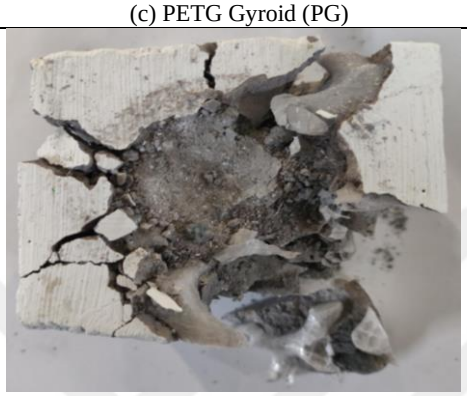
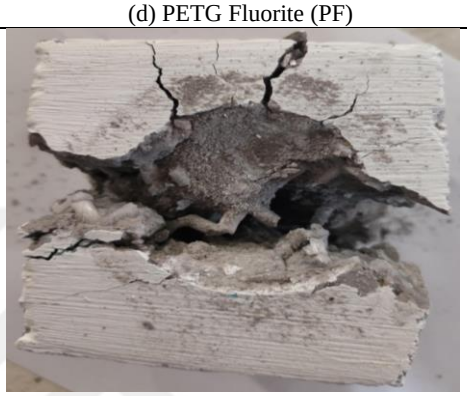
Resim 4.2 incelendiğinde, 4(a) ve 4(e) referans olarak kullanılan kontrol harcına göre, TPU içeren Gyroid ve Fluorite yapıların yüksek darbe dayanımı, yük dağılımının homojenliği ve çatlak yayılmasını geciktirme gibi avantajlar sunduğu görülmektedir. Çimento esaslı kontrol harcı ve lifli harcın darbe etkisiyle ani bir kırılma gösterdiği görülmektedir. Gyroid ve fluorite kafes yapılı çimento esaslı harçların ise darbe etkisiyle dağılmadığı ve kendi geometrik şeklini koruduğu görülmektedir. Kontrol harcı ile karşılaştırıldığında ise; TPU Gyroid, en yüksek enerji emme ve şekil değiştirme kapasitesine sahip; TPU Fluorite, yüksek dayanım ve lokal deformasyonlarla enerji absorpsiyonu gösterdiği; Kontrol numunesinin ise düşük tokluk ve ani kırılma davranışı sergilediği görülmüştür.

Bu bulgular, darbe dayanımının sadece malzeme değil, kafes geometrisinin de önemli bir belirleyici olduğunu, gyroid yapıların üstün enerji dağıtımı sağladığını göstermektedir.

Resim 4.3 (a–h) görselleri, PETG Gyroid (PG) ve PETG Fluorite (PF) yapılarının, darbe dayanımı açısından kontrol harcı (K) ve çelik lif (ÇL) ile karşılaştırılmasını vermektedir.

İlk Vuruş	 (a) Kontrol (K)	 (b) Çelik Lifli (ÇL)
Nihai Vuruş	 (e) Kontrol (K)	 (f) Çelik Lifli (ÇL)
Son vuruş	3 Vuruş	12 Vuruş

Resim 4.3. PETG gyroid, PETG fluorite darbe deneyine ait görseller

İlk Vuruş	 (c) PETG Gyroid (PG)	 (d) PETG Fluorite (PF)
Nihai Vuruş	 (g) PETG Gyroid (PG)	 (h) PETG Fluorite (PF)
Son vuruş	5 Vuruş	10 vuruş

Resim 4.3. (devam) PETG gyroid, PETG fluorite darbe deneyine ait görseller

Resim 4.3a incelendiğinde, ilk vuruşta sınırlı bir deformasyon gözlemlense de gevrek yapısından ötürü kontrol numunesi darbe enerjisi düşük kalmıştır. Nihai vuruşta numunenin bütünlüğünün bozulduğu, kırılma veya parçalanma meydana geldiği, tipik gevrek kırılma sonucuna ulaşılmıştır.

Resim 4.3b'de Çelik lifli numunenin darbe dayanımı incelediğinde, ilk vuruşta, gyroide benzer ancak daha sınırlı bir deformasyon gözlenmiştir. Nihai vuruşta ise yapı, lifli yapının esnekliği sayesinde yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde korumuş olup üstün bir darbe davranışı sergilemektedir. Ayrıca giriş kısmında anlatılan liflerin rastlantısal dağılımın ne kadar değişken davranış sergilediği görülmektedir. Resim 4.2b dikkatli incelendiğinde başlangıçta oluşan çatlağın ilerlemediği sonradan oluşan başka çatlakların parçalanmada etkin rol aldığı görülmektedir. Üst çatlağa dikkatli bakıldığında iki tane çelik lif görülmektedir. Ancak dayanım kaybına neden olan diğer çatlaklarda lif gözlenmemektedir. Bu durum çelik lifin rastgele dağılmasından dolayı olmaktadır. Rastlantısal ya da olasılık olarak lifin orada olup olmaması sürekliliği olmayan dayanım performansına neden olmaktadır.

Resim 4.3c'de PETG Gyroid (PG)in darbe dayanımı incelendiğinde; ilk vuruşta yapıda çatlak yayılımı meydana geldiği, yapının büyük ölçüde darbe enerjisini absorbe ettiği anlaşılmaktadır. Nihai vuruşta ise yapı, kırılmadan çok şekil değiştirerek enerjiyi yutmuş, çökme ya da lokal ezilme gibi sünek davranışlar sergilemiştir. Gyroid geometrisinin doğal olarak sunduğu yük dağılımı avantajı, PETG'nin yarı gevrek ve enerji sönümleyici özellikleriyle birleşerek yüksek darbe dayanımı sağlamıştır.

Resim 4.3d'de PETG Fluorite (PF)in darbe dayanımı incelediğinde, ilk vuruşta, gyroide yapıya benzer ancak daha sınırlı bir deformasyon gözlenmiştir. Nihai vuruşta ise yapı, PETG'nin esnekliği sayesinde yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde korumuş olup geometri kaynaklı lokal gerilim birikimi nedeniyle bazı kırılmalar veya çatlamalar görülmüştür. Fluorite yapı, enerji emmede gyroid kadar etkili olmasa da kontrol harcına göre çok daha üstün bir darbe davranışı sergilemektedir.

Çimento esaslı harç serilerinin darbe direnci performansları Çizelge 4.5'te verilmiştir. İlk görünür çatlakla sonuçlanan darbe sayısı (N1) ve nihai darbe sayısı (N2) olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Darbe testi sonuçları tablosu

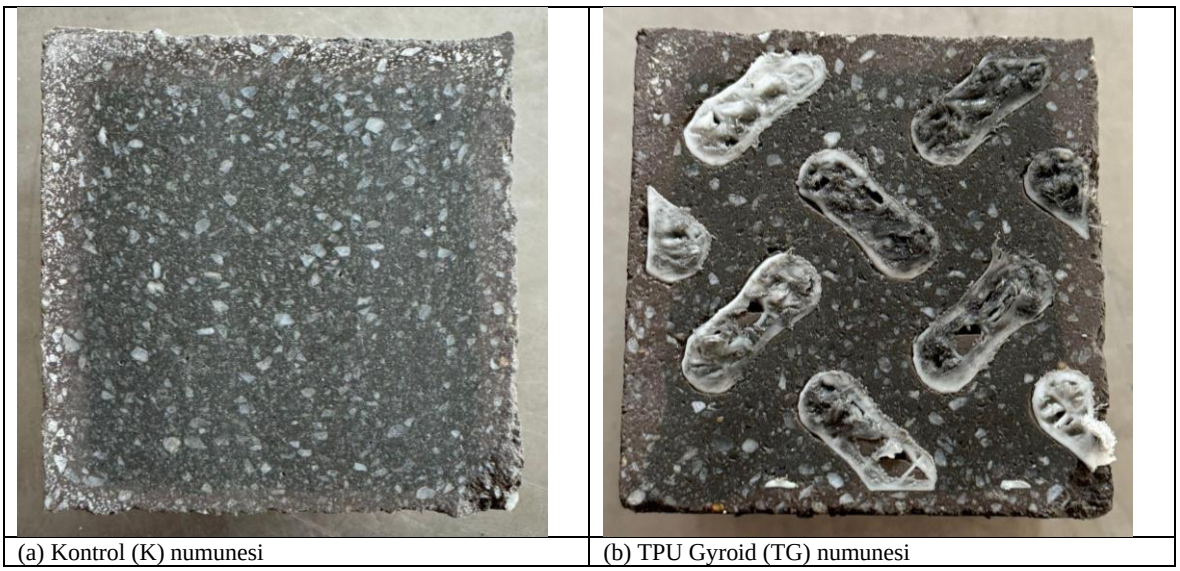
Seriler	Vuruş sayısı		Darbe enerjisi (Joule)	
	İlk çatlak-N1	Nihai vuruş-N2	İlk Çatlak-W1	Nihai enerji-W2
K	1	3	19,95	59,85
SL	1	11	19,95	219,45
ÇL	1	12	19,95	239,4
TG	1	93	19,95	1855,35
TF	1	300	19,95	5985,00
PG	1	7	19,95	99,75
PF	1	10	19,95	199,50

Darbe testi sonuçları tablosu Çizelge 4.5'te verilmiştir. Darbe dayanımı açısından PETG'nin polimerik matris özelliği ve kafes geometrisinin etkileri açıkça görülmektedir. Özellikle gyroid yapının, (Ashby, 2006) diyagramları çerçevesinde değerlendirildiğinde, yüksek enerji yutma kapasitesi ve şekil değiştirme yeteneği ile tokluk–dayanım dengesi açısından ideal bir yapı sunduğu söylenebilir.

Kontrol numunesinin ilk vuruş ve son vuruş arasında üç kata varan enerji farkı gözlenmiştir. TPU filamentli olan numuneler çok yüksek darbe dayanımı göstermiştir. Fluorite kafes modelinde olan numuneler 300 vuruşa giderek yaklaşık ilk vuruş enerjisini 300 kat artırmıştır. Gyroid olan modelin ise 93 vuruşa gittiği gözlenmiştir. Deney sırasında bilyenin kendisine bir yer hazırladığı ve bu kumul yatakta enerji kaybını sönümlediği sonucuna varılmıştır. Benzer çalışmalar bu konuya değinmiştir (Abid, Hussein, Ali ve Kazem, 2020). Filamentin kafes yapsının yay etkisi sağladığı bilyenin içeri girip çıktığı ve bunun benzer dayanım sağladığı gözlenmiştir (Abid ve diğerleri, 2020). Bu durumun önüne geçmek için bilyenin tutulmasını sağlayan bilezik yapısının düşen kütleye karşı teması olup olmadığı incelenmiştir. Temas olmasının kanıtlanması için düşen kütlenin altı boyanmış ve bilezikte bu boya gözlendiğinde deney bitmiş sayılmıştır. TPU gyroid numunesinin bilezik renklenmesi sonucu deneyi bitirilmiştir. Deneyin devam etmesi durumunda daha çok enerji alabileceği öngörülmüştür. PETG filamentlerden oluşan grup ise dağılmıştır. Diğer deneylerde gözlendiği gibi 3B yazıcı sonrasında gevrekleşen malzeme gevrek davranış sergileyerek darbe dayanımı testinde düşük performans göstermiştir.

4.4. İçyapı Görüntüleri

Çimento esaslı tüm numunelerin sulu kesim elmas testere ile kesimleri gerçekleştirilmiştir. Kesim sonrası görüntüleri 1/1 ölçekte fotoğraflanmıştır. Resim 4.4'te Kontrol (K) ve TPU Gyroid (TG) numunelerinin kesimden sonraki yüzey görüntüleri verilmiştir.

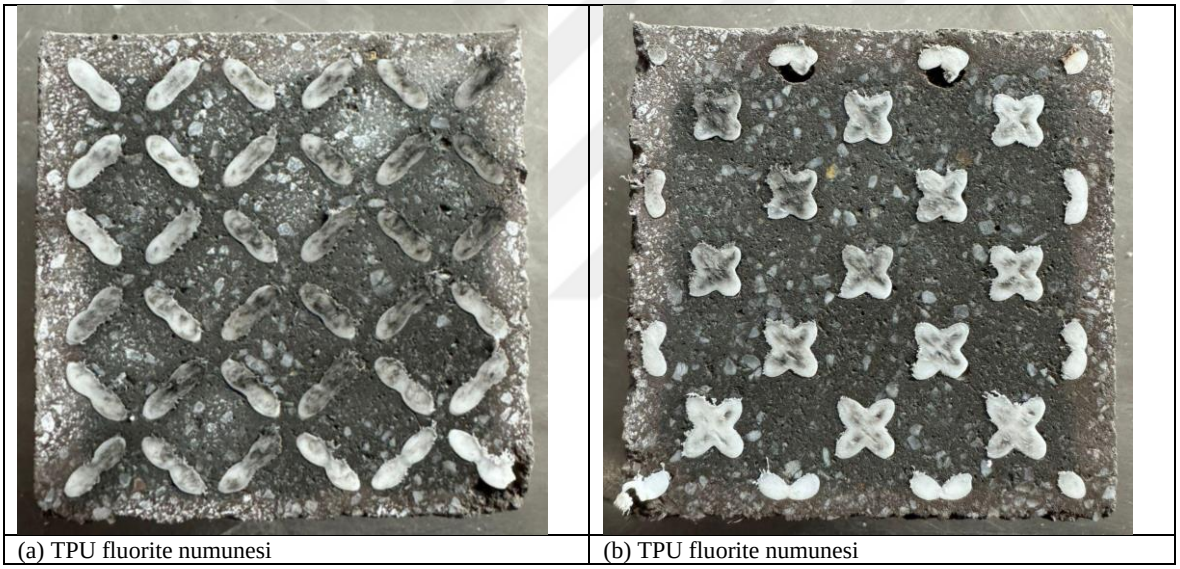


(a) Kontrol (K) numunesi | (b) TPU Gyroid (TG) numunesi

Resim 4.4. Kontrol (K) ve TPU Gyroid (TG) numunesinin kesimden sonraki yüzey görüntüsü

Kontrol numunenin kesim sonrasındaki yüzeyi incelendiğinde Resim 4.4a'da hapsolmuş hava keseciklerinin oluşturduğu boşluklar görülmektedir. TPU Gyroid numunesinin kesim sonrasında yüzey görüntüsü incelendiğinde (Resim 4.4b) kafes yapının düzgün yerleştiği gözlenmektedir.

TPU filamentin esnek yapısı ve sulu kesim elmas uçlu testerenin kesim sırasında yüksek ısı uygulayarak kesim işlemini gerçekleştirmesi; filamentin yanmasına ve şekil değiştirmesine neden olmuştur. Resim 4.4b incelendiğinde TPU Gyroid numunesi içerisinde yer alan harcın, düzgün yayılarak boşluksuz yerleşim yaptığı gözlenmektedir. Harcın filament yüzeylerindeki aderansı dikkat çekicidir. Agrega tanelerinin de düzgün dağılım gösterdiği Resim 4.4b'den net bir şekilde anlaşılmaktadır.

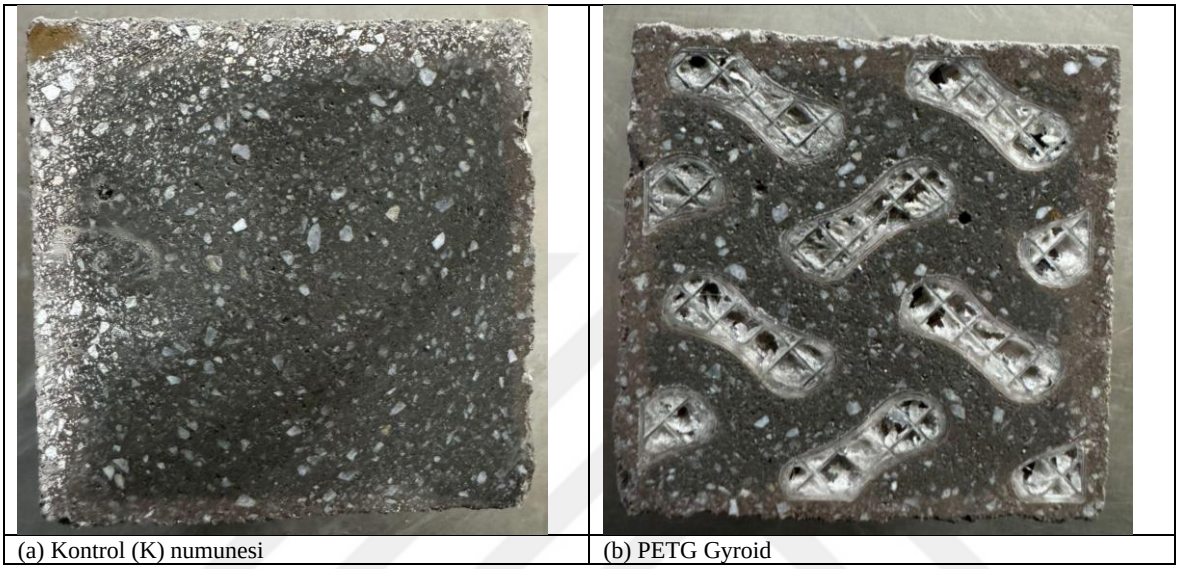


(a) TPU fluorite numunesi | (b) TPU fluorite numunesi

Resim 4.5. TPU Fluorite numunenin kesimden sonraki farklı yüzey görüntüleri

TPU Fluorite numunenin kesimi sırasında farklı yüzeylerin görüntüleri Resim 4.5'te verilmiştir. Kontrol numunesinin kesim sonrasındaki görüntüsüne benzer şekilde Resim 4.5a'da yer alan TPU Fluorite numunesinin yüzeyinde hapsolmuş boşluklar gözlenmektedir. Resim 4.5a incelendiğinde TPU fluorite numunesi içerisinde yer alan harcın, düzgün yayılarak boşluksuz yerleşim yaptığı gözlenmektedir. Numunenin sağ alt köşesinde kafes ile harç arasında boşluk olduğu gözlenmiştir. Bu durum sulu kesim elmas uçlu testere kesimi sırasında numunenin sağ alt köşesinin kırılması şeklide yorumlanmaktadır. Beyaz renk olan agrega tanelerinin düzgün dağılım gösterdiği Resim 4.5a'dan anlaşılmaktadır.

Resim 4.5b incelendiğinde TPU fluorite numunenin üst kısımda; harcın kafes yapısı etrafında boşluk oluşturduğu görülmektedir. TPU fluorite numunesi içerisinde yer alan harcın, düzgün yayılarak boşluksuz yerleşim yaptığı gözlenmektedir. Harcın filament yüzeylerindeki aderansı dikkat çekicidir. Beyaz renk olarak görülen agrega tanelerinin düzgün dağılım gösterdiği Resim 4.5b' den net bir şekilde anlaşılmaktadır.

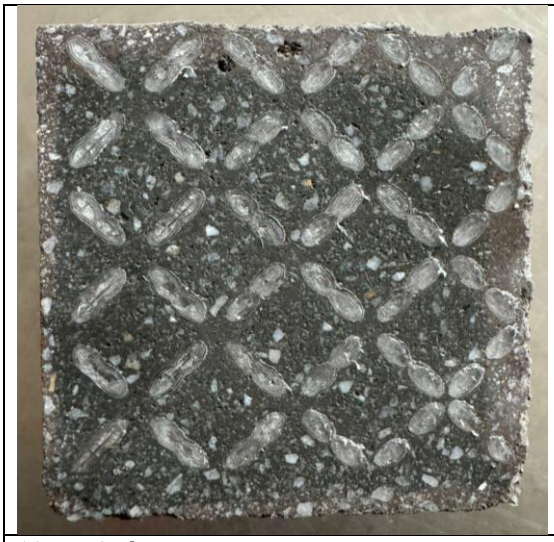


(a) Kontrol (K) numunesi | (b) PETG Gyroid

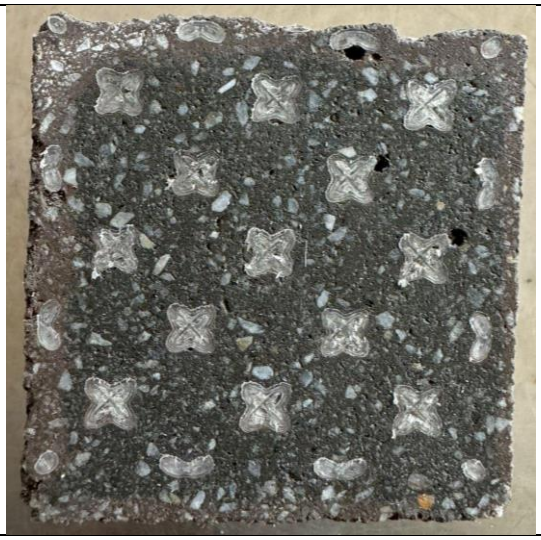
Resim 4.6. Kontrol (K) ve PETG Gyroid (PG) numunenin kesimden sonraki yüzey görüntüsü

Kontrol numunenin Resim 4.6a görüntüsüne benzer şekilde yüzeyi incelendiğinde Resim 4.6b'de yer alan PETG Gyroid numunenin yüzeyinde hapsolmuş hava keseciklerinin oluşturduğu boşluklar görülmektedir. PETG Gyroid numunesinin yüzeyinde kontrol numunenin yüzeyine benzer şekilde boşluklar gözlenmektedir.

Resim 4.6b'de PETG Gyroid kafes yapısının harcın içerisine düzgün yerleştiği gözlenmektedir. Kafes yapısının kenarlara olan mesafesi; harç ile düzgün kaplandığını kanıtlamaktadır. Kafes yapısı ile harç yüzeyi arasında aderansın dikkat çekici olduğu görülmektedir. PETG filamentin gevrek yapısı ve sulu kesim elmas uçlu testerenin kesim sırasında yüksek ısı uygulayarak kesim işlemini gerçekleştirmesi; filamentin yanmasına ve şekil değiştirmesine neden olmuştur. Resim 4.6b incelendiğinde PETG Gyroid numunesi içerisinde yer alan harcın, düzgün yayılarak neredeyse boşluksuz yerleşim yaptığı gözlenmektedir. Beyaz renk olarak görülen agrega tanelerinin düzgün dağılım gösterdiği Resim 4.6b'den net bir şekilde anlaşılmaktadır.



(a) PETG Fluorite



(b) PETG Fluorite

Resim 4.7. PETG Fluorite numunenin kesimden sonraki farklı yüzey görüntüleri

PETG Fluorite numunenin kesim sırasında ortaya çıkan farklı yüzey görüntüleri Resim 4.7'de verilmiştir. Kontrol numunesinin kesim sonrasındaki yüzeyine benzer şekilde PETG Fluorite numunenin yüzeyinde farklı boşluklar gözlenmiştir. Resim 4.7a incelendiğinde kafes yapısının harç ile tamamen uyumu gözlenmiştir. Kesim sırasında açığa çıkan ısı ve filamentin gevrek yapısından dolayı filament şekil değiştirmiştir. Yüksek ısıdan kaynaklanan büzülme bazı yüzeylerde ve noktalarda gözlenmiştir. Ayrıca kafes yapısının harç ile iyi aderans oluşturması dikkat çekicidir.

Resim 4.7b'de PETG Fluorite kafes yapısının harcın içerisine düzgün yerleştiği gözlenmektedir. Kafes yapının kenarlara olan mesafesi harç ile düzgün kaplandığını kanıtlamaktadır. Kafes yapısı ile harç yüzeyi arasında aderansın dikkat çekici olduğu görülmektedir. PETG Fluorite numunesi içerisinde yer alan harcın, düzgün yayılarak boşluksuz yerleşim yaptığı gözlenmektedir. Beyaz renk olan agrega tanelerinin düzgün dağılım gösterdiği Resim 4.7b'den anlaşılmaktadır. Sonuç olarak kafes yapı içeren numunelerde aderans oluşumunun tatmin edici düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, polimer esaslı üç boyutlu (3B) kafes yapılar içeren çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri incelenmiştir. TPU ve PETG filamentleri kullanılarak tasarlanan gyroid ve fluorite formundaki 3B polimer kafes yapılar, çimento esaslı harçlar içerisine yerleştirilerek numuneler üretilmiştir. Numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı deneyleri yapılmış ve içyapı görüntüleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Basınç dayanımı deneyleri sonucunda, özellikle TPU Gyroid ve TPU Fluorite yapılar içeren numunelerin kontrol (K), çelik lif (ÇL) ve sentetik lif (SL) katkılı numunelere kıyasla önemli ölçüde daha sünek bir kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, TPU'nun yüksek esnekliği ve kafes yapının deformasyon anında yük dağılımını yayma kabiliyetiyle ilişkilendirilmiştir. Bu numuneler için basınç dayanım değerlerinde iyileşme olmamasına rağmen, çatlama sonrasındaki enerji sönümleme kapasitesinin ciddi oranda arttığı tespit edilmiştir.
- Eğilme dayanımı deney sonuçları değerlendirildiğinde, polimer kafes yapıların betonun tokluğunu kayda değer şekilde artırdığı belirlenmiştir. Özellikle TPU Gyroid yapı ile üretilen numunelerde, kontrol (K) numunesine göre önemli bir artış tespit edilmiştir. PETG filamentleri ile üretilen Gyroid ve Fluorite yapıların da tokluğa pozitif katkı sunduğu, ancak TPU'ya göre iyileşmenin daha sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür.
- Darbe dayanımı deneyleri sonucunda, polimer kafes içeren numunelerin daha fazla sayıda darbe etkisine direnç gösterdiği görülmüştür. TPU Fluorite yapısı darbe dayanımı testinde en iyi performansı göstermiş, kontrol numunelerine göre önemli ölçüde daha fazla darbe enerjisi absorbe etmiştir.
- İçyapı görüntüleri değerlendirmeleri sonucunda, kafes yapı içeren numunelerde kafesle matrisin birleşim noktalarında iyi düzeyde aderansın sağlandığı tespit edilmiştir. Kafes yapısındaki hücresel düzen, harcın kırılma sürecindeki gerilme dağılımını etkileyerek yapının genel şekil değişimine ve tokluk performansına katkı sağlamıştır.
- Üç boyutlu kafes yapılar, betonun çatlama sonrası deformasyon kabiliyetini artırarak yapının ani kırılmalarını engellemiş ve genel tokluk performansını iyileştirmiştir. Gyroid ve fluorite kafes yapılar betonun eğilme ve darbe etkileri altında daha dayanıklı olmasına katkı sağlamıştır. Özellikle üç boyutlu kafeslerde TPU filamentinin kullanıldığı

numunelerde bu filamentin daha elastik ve şekil değiştiren yapısı sebebiyle tokluk ve enerji emilimi konusunda iyileşmenin daha yüksek düzeyde olduğu görülmüştür.

Öneriler

- PLA, ABS, karbon fiber takviyeli filamentler gibi farklı termoplastiklerin veya biyobozunur polimerlerin etkisi de ileride yapılacak olan çalışmalarda incelenebilir.
- Polimer kafes takviyeli çimento bazlı kompozitler, yeterli dayanımın sağlanması şartıyla özellikle darbe riski yüksek altyapı elemanları (bordürler, prefabrik duvar panelleri, demiryolu traversleri, darbe emiciler vb.) için alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebilir.
- Korozyona dayanıklı, hafif ve şekil verilebilir bu kompozit sistemler, prefabrik yapı elemanlarının üretiminde çevreci ve ekonomik bir alternatif olarak kullanılabilir.
- 3B baskı teknolojisinin yapı elemanı üretimine entegrasyonu için, üretim sürecinde yer alacak makineler, yazılım destekli modellemeler ve sahada uygulama yöntemleri geliştirilmelidir.
- PETG ve TPU gibi malzemelerin geri dönüştürülmüş formlarının kullanım olanakları değerlendirilerek, bu teknoloji daha sürdürülebilir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

Abid, S. R., Hussein, M. L. A., Ali, S. H., ve Kazem, A. A. F. (2020). Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test. *Construction and Building Materials*, 244(1), 118321-119322.

Abueidda, D. W., Elhebeary, M., Shiang, C. A., Pang, S., Al-Rub, R. K., ve Jasiuk, I. M., (2019). Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study. *Materials and Design*, 165(1), 107597-107560.

Al Nashar, A., ve Sutradhar, A. (2021). Mechanical behavior of hierarchical lattice structures: A review. *Materials Today Communications*, 28(1), 102667-102676.

American Concrete Institute (ACI) (1999). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. (3rd Edition).ACI 544.2R-89. Farmington Hills, MI: ACI, 186.

Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30.

ASTM (2012). *Designation: F2792-12a – Standard terminology for additive manufacturing technologies.* West Conshohocken, PA: ASTM International, 206.

Ateş, A.O., Khoshkholghi, S., Tore, E., Marasli, M., ve Ilki, A. (2019). Sprayed glass fiber–reinforced mortar with or without basalt textile reinforcement for jacketing of low-strength concrete prisms. *Journal of Composites for Construction*, 23(2), 19-33.

Bai, L., Gong, C., Chen, X., Sun, Y., Xin, L., Pu, H., Peng, Y., ve Luo, J. (2020). Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 182(1), 105735-105746.

Barr, B.I.G., Liu, K. ve Dowers, R.C.A. (1982). Toughness Index measure the linergy absorption of fibre reinforced concrete, *International Journal Cement Composities and Lightweight Concrete*, 4(4), 221- 227.

Borikar, G. P., Patil, A. R., ve Kolekar, S. B. (2023). Additively manufactured lattice structures and materials: Present progress and future scope. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(11), 2133–2180.

Caminero, M. A., Chacon, J. M., Garcia-Moreno, I., ve Rodriguez, G. P. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continues fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composite Part B: Engineering*, 148(1), 93-103.

Cesaretti, G., Dini, E., Kestelier, X. D., Colla, V., ve Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93(1), 430-450.

Chen, M., Chen, Z., Xuan, Y., Zhang, T., ve Zhang, M., (2023). Static and dynamic compressive behaviour of 3D printed auxetic lattice reinforced ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 139(1), 105046-105056.

Chen, Q. Z., Thompson, I. D., ve Boccaccini, A. R. (2006). 45S5 Bioglass®-derived glass–ceramic scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 27(1), 2414–2425.

Choudhry, N. K., Nguyen, T.K., Nguyen-Van, V., Panda, B., ve Tran, P. (2024). Auxetic lattice reinforcement for tailored mechanical properties in cementitious composite: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials*, 438(1), 137252-137262.

Curodeau, E. S., ve Caldarise, S. (2000). Design and fabrication of cast orthopedic implants with freeform surface textures from 3-D printed ceramic shell. *Journal of Biomedical Materials Research*, 53(5), 525–535.

Çelik, S., ve Gür, Y. (2021). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen ABS ve karbon fiber takviyeli ABS kompozitlerde üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(1), 200-209.

DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O. Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., ve Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92(1), 112-224.

Dehurtevent, M., Robberecht, L., Hornez, J. C., Thuault, A., Deveaux, E., ve Béhin, P. (2017). Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing. *Dental Materials*, 33(5), 477-485.

Derby, B. (2011). Inkjet printing ceramics: From drops to solid. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(14), 2543-2550.

Dick, A., Bhandari, B., ve Prakash, S. (2019). 3D printing of meat. *Meat Science*, 153(1), 35–44.

Dokuz, M. E., Aydın, M., ve Uyaner, M. (2021). Compressive strength of DLP 3D printed various micro lattices for bone tissue engineering. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(3), 361-371.

Dong, G., Tang, Y., ve Zhao, Y. F. (2017). A survey of modeling of lattice structures fabricated by additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 139(10), 100906-100910.

Doreau, F., Chaput, C., ve Chartier, T. (2000). Stereolithography for manufacturing ceramic parts. *Advanced Engineering Materials*, 2(8), 493-496.

Farid, M. I., Wu, W., WeiGui, L., ve Zhao, Y. (2023). Research on 3D printing composite material mechanical properties-characterization of robust soft-matter robots. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1(1), 1-20.

Gür, Y., Çelik, S., ve Sakin, R. (2024). Tensile behaviour of continuous carbon fibre reinforced composites fabricated by a modified 3D printer. *Materials Research Express*, 11(7), 75305-75311.

Hao, W., Liu, J., ve Kanwal, H. (2023). Compressive properties of cementitious composites reinforced by 3D printed PA 6 lattice. *Polymer Testing*, 117(1), 107811-107819.

Hedayati, R., ve Stulova, V. (2023). 3D printing for space habitats: Requirements, challenges, and recent advances. *Aerospace*, 10(7), 653-665.

Higuera, S., Miralbes, R., ve Ranz, D. (2021). Mechanical properties and energy–absorption capabilities of thermoplastic sheet gyroid structures. *Mechanics of Advanced Materials and Strukctures,* 29(25), 4110-4124.

Hitzler, L., Alifui-Segbaya, F., William, P., Heine, B., Heitzmann, M., Hall, W., Merkel, M., ve Ochner, A. (2018). Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: Analysis of microstructure and physicomechanical properties. *Advances in Materials Science and Engineering,* 8(1), 1-12.

Horst, D.J., Duvoisin, C.A., ve Viera, R.A. (2018). Additive manufacturing at Industry 4.0: A review. *International Journal of Engineering and Technical Research,* 8(8), 1-8.

İnternet: Lang, M. (2019). An overview of laser metal deposition. *The Fabricator*. Web: https://www.thefabricator.com/article/additive/an-overview-of-laser-metal-deposition, Son Erişim Tarihi:15.03.2025.

İnternet: Muller, A., ve Karevska, S. (2016). How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain?. *EY's Global 3D printing Report 2016*. Web: https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-global-3D-printing-report-2016-full-report/$FILE/ey-global-3D-printing-report-2016-full-report.pdf, Son Erişim Tarihi:22.06.2025.

İnternet: Reddy, P. (2016). Digital light processing (DLP). *Think 3D*. Web: https://www.think3D.in/digital-light-processing-dlp-3D-printing-technology-overview, Son Erişim Tarihi:11.07.2025.

İnternet: Silbernagel, C. (2018). Additive manufacturing 101-4: What is material jetting?. *Canada Makes*. Web: http://canadamakes.ca/what-is-material-jetting/, Son Erişim Tarihi:25.01.2025.

İnternet: Verbatim GmbH (2025). *Filament karşılaştırma tablosu.* Web: https://www.verbatim-europe.com/tr/3D/filament-comparison-chart, Son Erişim Tarihi: 01.11.2025.

Jo, W., Yoon, B. J., Lee, H., ve Moon, M. (2017). 3D printed hierarchical gyroid structure with embedded photocatalyst TiO2 nanoparticles. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(1), 4-12.

Karabulut, M. Y. (2017). *Sentetik lifin ultra yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme davranışına etkisinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 102.

Karabulut, M. Y., ve Yazıcıoğlu, S. (2025). Üç boyutlu polimer kafes yapıları ile çimento esaslı kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science,* 5(1), 313-326.

Karakoç, C, (1985). *Aderans mekanik etkileşim olayı.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 86.

Koç, V., ve Emiroğlu, Y. (2015). A study about determination of preliminary design & minimum reinforcement ratios. *Computers and Concrete, An International Journal*, 17(5), 683-702.

Korkmaz, E., Aydın, M., ve Gümrük, R. (2022). Design and mechanical characterization of lattice structures with spatial density gradient produced by additive manufacturing. *Materials Today Communications,* 33(1), 104616-104622.

Kruth, J.P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., ve Rombouts, M. (2005) Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyp Journal*, 11(1), 26–36.

Leary, M. (2020). Design of lattice and zero-mean curvature structures. In M. Leary (Ed.), *Design for additive manufacturing*. (1st Edition). New York: Elsevier, 123–163.

Li, D., Liao, W., Dai, N., ve Xie, Y. M. (2019). Comparison of mechanical properties and energy absorption of sheet-based and strut-based gyroid cellular structures with graded densities. *Materials*, 12(13), 2183-2192.

Li, J., Cao, S., ve Song, W. (2023). Flexural behavior of cementitious backfill composites reinforced by various 3D printed polymeric lattices. *Composite Structures*, 2(1), 102-111.

Li, L. B., Zhang, Z. W., Wang, W. M., ve Liu, Y. (2023). Hybrid lattice structures: Design strategies and mechanical performance. *Materials & Design,* 231(1), 111881-111899.

Li, L., Wang, Y., Chen, X., ve Zhou, Y. (2022). Functionally graded and hybrid lattice structures fabricated by additive manufacturing: A review. *Additive Manufacturing*, 51(1), 102591-102602.

Liu, F., ve Wang, X. (2020). Synthetic polymers for organ 3D printing. *Polymers*, 12(8), 1765-1777.

Liu, J., Kanwal, H., Tang, C., ve Hao, W. (2022). Study on flexural properties of 3D printed lattice-reinforced concrete structures using acoustic emission and digital image correlation. *Construction and Building Materials,* 333(1), 127418-127422.

Low, Z., Chua, Y.T., Ray, B.M., Mattia, D., Metcalfe, I.S., ve Patterson, D.A. (2017). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of Membrane Science*, 523(1), 596-613.

Martin, J.H., Yahata, B. D., Hundley, J. M., Mayer, J. A., Schaedler, T. A., ve Pollock, T. M. (2017). 3D Printing of high-strength aluminium alloys. *Nature*, 549(7672), 356-369.

Meurisse, A., Makaya, A., Willsch, C., ve Sperl, M. (2018). Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*, 152(1), 800-810.

Meza, L. R., Das, S., ve Greer, J. R. (2015). Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices. *Science,* 345(6202), 1322-1326.

Mille, C., Tyrode, E. C., ve Corkery, R. W. (2011). Inorganic chiral 3-D photonic crystals with bicontinuous gyroid structure replicated from butterfly wing scales. *Chemical Communications,* 35(1), 20-31.

Murr, L. E (2016). Frontiers of 3D printing/additive manufacturing: from human organs to aircraft fabrication. *Journal of Materials Sciences and Technology*, 3(10), 987-995.

Nguyen, T. K., Suhaizan, M. S., ve Nguyen-Xuan, H., (2023). Mechanical responses of buoyant bio-inspired foamed concrete structuresb. Cons*truction and Building Material*s, 391(1), 131731-131741.

Nguyen-Van, V., Tran, P., Peng, C., Pham, L., Zhang, G., ve Nguyen-Xuan, H., (2020). Bioinspired cellular cementitious structures for prefabricated construction: Hybrid design & performance evaluations. *Automation in Construction*, 119(2), 103324-103339.

Owen, D., Hickey, J., Cusson, A., Ayeni, O. I., Rhoades, J., Yifan, D., Limmin, W., Hye-Yeong, P., Nishant, H., Raikar, P. P., Yeon-Gil., ve Jing, Z. (2018). 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1), 1-7.

Öztürk, M., Sevim, U. K., Akgöl, O., ve Karaaslan, M. (2016). Çelik lif ile güçlendirilmiş betonlarda lif yönünü ve dağılımını belirlemede yeni bir yaklaşım. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 187-192.

Pan, C., Han, Y., ve Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. *Applied Sciences*, 10(18), 6374-6388.

Park, K. M., Min, K. S., ve Roh, Y. S. (2022). Design optimization of lattice structures under compression: Study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*, 15(1), 1–17.

Peng, C., ve Tran, P., (2020). Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings. *Composites Part B*, 188(1), 107773-107801.

Qin, S., Cao, S., Yılmaz, E., ve Li, J. (2021). Influence of types and shapes of 3D printed polymeric lattice on ductility performance of cementitious backfill composites. *Construction and Building Materials*, 307(1), 124973-124988.

Ramachandraiah, K. (2021). Potential development of sustainable 3D-Printed meat analogues: A review. *Sustainability*, 13(2), 938-946.

Saba, M., Wilts, B. D., Hielscher, J., ve Schröder-Turk, G. E. (2014). Absence of circular polarisation in reflections of butterfly wing scales with chiral Gyroid structure. *Materials Today: Proceedings*, 1(1), 193–208.

Salazar, B., Aghdasi, P., Williams, I. D., Ostertag, C. P., ve Taylor, H. K. (2020). Polymer lattice-reinforcement for enhancing ductility of concrete. *Materials and Design*, 196(1), 109184-109196.

Salazar, B., Williams, I. D., Aghdasi, P., Ostertag, C., ve Taylor, H. (2018/29-30 April). *Bending and crack characteristics of polymer lattice-reinforced mortar*. In M. M. R. Taha (Ed.), International Congress on Polymers in Concrete. Champaign: Springer, 261–266.

Seharing, T., Sridharan, R., ve Moghaddam, N. S. (2020). Design of graded lattice structures for tailored energy absorption. *Additive Manufacturing*, 36(1), 101503-101522.

Skoratko, A., Szatkiewicz, T., Katzer, J., ve Jagoda, M. (2022). Mechanical properties of mortar beams reinforced by gyroid 3D printed plastic spatial elements. *Cement and Concrete Composites,* 134(2022), 104809-106001.

Slots, C., Jensen, M. B., Ditzel, N., Hedegaard, M. A., Borg, S. W., Albrektsen, O., Thygesen, T., Kassem, M., ve Andersen, M. Ø. (2017). Simple additive manufacturing of an osteoconductive ceramic using suspension melt extrusion. *Dental Materials*, 33(2), 198-208.

Song, J., Cao, M., Cai, L., Zhou, Y., Chen, J., Liu, S., Zhou, B., Lu, Y., Zhang, J., Long, W., ve Li, L. (2021). 3D printed polymeric formwork for lattice cementitious composites. *Journal of Building Engineering,* 43(1), 103074-103079.

Stansbury, J.W., ve Idacavage, M. J. (2016). 3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials,* 32(1), 54-64.

Suzuki, J., Seki, M., ve Matsushita, Y., (2000). The tricontinuous double-gyroid structure from a three-component polymer system. *Journal of Chemical Physics,* 112(1), 10-29.

Syed, A. M. T., Elias, P. K., Amit, B., Susmita, B., Lisa, O., ve Charitidis, C. (2017). Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 1(1), 1-16.

Syrlybayev, D., Perveen, A. ve Talamona, D. (2023). Experimental investigation of mechanical properties and energy absorption capabilities of hybrid lattice structures manufactured using fused filament fabrication. *Int Journal Adv Manuf Technol,* 125(1), 2833–2850.

Tang, C., Liu, J., Hao, W., ve Wei, Y., (2023). Flexural properties of 3D printed graded lattice reinforced cementitious composites using digital image correlation. *Materials and Design,* 227(1), 111734-111744.

Taşkan, E., Gündüz, Y., ve Şahin, Y. (2019). Çelik tel donatılı betonların mekanik özelliklerinin görüntü analizleri ile tahmini. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 77-90.

Tiwari, S.K., Pande, S., Agrawal, S., ve Bobade, S. M. (2015). Selection of selective laser sintering materials for different applications. *Rapid Prototyping Journal*, 21(6), 630-648.

Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlordt, T., ve Greil, P. (2014). Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials,* 16(6), 729-754.

Trevisan, F., Calignano, F., Aversa, A., Marchese, G., Lombardi, M., Biamino, S., Ugues, D., ve Manfredi, D. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications. *Journals Indexing & Metrics*, 16(2), 57-67.

Tsang, H. H., Poon, K. M., ve Ho, C. W. (2019). Hierarchical cellular structures: Design, properties and fabrication. *Additive Manufacturing*, 28(1), 35–52.

Uğur, M.D., Gharehpapagh, B. Yaman, U., ve Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11(1), 545-554.

Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., ve Borille, A. V. (2015). Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. *Procedia CIRP*, 35(1), 55-60.

Valvez, S., Santos, P., Parente, J. M., Silva, M. P., ve Reis, P. N. B. (2020). 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites: A short review. *Procedia Structural Integrity*, 25(1), 394-399.

Ventola, C. L. (2014). Medical application for 3D printing: Current and projected uses. *Medical Devices*, 39(10), 1-8.

Vikayavenkataraman, S., Jerry, Y.H.F., ve Wen, F.L. (2017). 3D Printing and 3D Bioprinting in Pediatrics. *Bioengineering*, 4(63), 1-11.

Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., ve Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A riew and prospective. *Composites Part B*, 110(1), 442-458.

Wikes, J., Hagedom, YC., Meiners, W., ve Wissenbach, K. (2013). Additive manufacturing of ZrO2–Al2O3 ceramic components by selective laser melting. *Rapid Prototyp Journal*, 19(1), 51–57.

Wu, J., Zhang, W., Sun, Y., Chen, H., ve Zhang, X. (2023a). Mechanical behavior and deformation characteristics of plate-based lattice structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 227(1), 111718-111722.

Wu, Y., Liu, J., Wang, X., ve Zhang, D. (2023b). Mechanical properties and deformation behavior of 3D auxetic lattice structures fabricated via additive manufacturing. *Materials & Design*, 231(1), 111898-111901.

Wu, Y., Luo, G., Cuniberti, Y., ve Xiao, Gelinsky, M. (2011). Threedimensional printing of hierarchical and tough mesoporous bioactive glass scaffolds with a controllable pore architecture, excellent mechanical strength and mineralization ability. *Acta Biomater* 7(1), 2644–2650.

Xie, B., Li, X., Zhao, X., ve Hu, N. (2023). Tunable properties and responses of architected lattice-reinforced cementitious composite components induced by versatile cell topology and distributions. *Composite Structures*, 312(1), 116850-117800.

Xin, W., Man, J., Zuowan, Z., Jihua, G., ve David, H. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B*, 110(1), 442-458.

Xu, Y., Zhang, H., Gan, Y., ve Savija, B., (2021). Cementitious composites reinforced with 3D printed functionally graded polymeric lattice structures: Experiments and modelling. *Additive Manufacturing*, 39(1), 101887-101897.

Xue, Y., Jiang, R., ve Lu, Y. (2023). Design strategies and applications of auxetic metamaterials: A review. *Advanced Engineering Materials*, 25(2), 2200864-2200875.

Yang, E., Leary, M., Lozanovski, B., Downing, D., Mazur, M., Sarker, A., Khorasani, A., Jones, A., Maconachie, T., Bateman, S., Easton, M., Qian, M., Choong, P., ve Brandt, M. (2019a). Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study. *Materials & Design*, 184(1), 108165-108172.

Yang, H., Zhao, S., ve Zhang, P. (2023). Multi-material hybrid lattice structures: Advances, challenges, and perspectives. *Composite Structures*, 311(1), 116848.

Yang, L., Mertens, R., Ferrucci, M., Yan, C., Shi, Y., ve Yang, S. (2019b). Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties. *Materials & Design*, 162(2), 394-404.

Yaşar, H., Ayas, K., Durmuş, A., ve Çavdar, K. (2025). Reçineden eklemeli imalat yöntemiyle üretilen polimer hibrit kafes yapıların yarı statik basma koşullarında mekanik özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1(1), 2309-2322.

Yee, L.Y., Yong, S.E.T., Heang, K.J.T., Zheng K.P., Xue, Y. L., Wai, Y. Y., Siang, C. H. T., ve Augustinus, L. (2017). 3D Printed Bio-models for Medical Applications. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 227-235.

Yi, H.-G., Lee, H., ve Cho, D.W. (2017). 3D Printing of Organs-On-Chips. *Bioengineering*, 4(1), 10-29.

Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., ve Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, 304(1), 116397-1163400.

Yumak, N., Pekbey, Y., ve Aslantaş, K. (2013). Zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiğinin araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(4), 1-21.

Ze-Xian, L., Yen, T.C., Ray, M. R., Mattia, D., Metcalfe, I.S., ve Patterson, D. A. (2016). Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques. *Journal of Membrane Science*, 523(1), 596-613.

Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson, J. A., Kucheyev, S. O., Fang, N. X., ve Spadaccini, C. M. (2014). Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*, 344(6190), 1373–1377.

Zheng, X., Smith, W., Jackson, J., Moran, B., Cui, H., Chen, D., Ye, J., Fang, N., Rodriguez, N., Weisgraber, T., ve Spadaccini, C. M. (2016). Multiscale metallic metamaterials. *Nature Materials*, 15(10), 1100–1106.

Zhu, H., Li, M., Huang, X., Qi, D., Nogueira, L. P., Yuan, Xi., Liu, W., Lei, Z., Jiang, J., Dai, H., ve Xiao, J. (2021). 3D printed tricalcium phosphate-bioglass scaffold with gyroid structure enhance bone ingrowth in challenging bone defect treatment. *Applied Materials Today*, 25(1), 101166-101176.

Zocca, A., Lima, P., ve Günster, J. (2017). LSD-based 3D printing of alumina ceramics. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(1), 141-148.



Gazili olmak ayrıcalıktır