
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN HİBRİT KAFES YAPISININ TASARLANMASI VE SÖNÜMLEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Yağmur BALTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA 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.

Yağmur BALTA
08/01/2026

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN HİBRİT KAFES YAPISININ TASARLANMASI VE SÖNÜMLEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Yağmur BALTA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisinin gelişimi, karmaşık geometrilere sahip kafes yapıların tasarım ve üretiminde yeni olanaklar sunmakta ve bu yapıların mekanik performanslarının fonksiyonel olarak optimize edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda, enerji sönümleme kapasitesi yüksek öksetik hücre geometrisi ile yük taşıma kabiliyeti ve rijitliği ile ön plana çıkan gövde merkezli kübik kafes yapılarının bir araya getirilmesiyle, üç boyutlu, simetrik ve özgün bir hibrit kafes mimarisi geliştirilmiştir. Tasarlanan hibrit yapı, eriyik yığma modelleme yöntemiyle poliaktik asit (PLA) malzemeden üretilmiş ve mekanik davranışları deneysel ve sayısal yöntemlerle değerlendirilmiştir. Malzeme karakterinin belirlenmesi amacıyla çekme testlerinin ardından, birim hibrit kafes hücrelerinin statik basma deneyleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri, deneysel bulgular ile karşılaştırılarak doğrulanmış; deformasyon mekanizmaları, enerji sönümleme davranışı ve Poisson oranı tepkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Ayrıca, hibrit kafes yapısının performansını iyileştirmek amacıyla iki farklı kademeli yoğunluk dağılımına sahip gradyan hibrit kafes tasarımı geliştirilmiştir. Bu gradyan yapıların mekanik tepkileri düzenli hibrit kafes sistemi ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gradyan geçişli kafes yapıların enerji sönümleme ile yapısal dayanım arasında düzenli hibrit yapı sistemine göre daha dengeli ve kontrollü bir mekanik performans sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu	:	91448
Anahtar Kelimeler	:	Hibrit kafes yapıları, öksetik yapı, gövde merkezli kübik yapı, enerji sönümleme, sonlu elemanlar analizi
Sayfa Adedi	:	131
Danışman	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

DESIGN AND INVESTIGATION OF THE DAMPING BEHAVIOR OF A HYBRID LATTICE STRUCTURE MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Yağmur BALTA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

The advancement of additive manufacturing technologies has enabled new opportunities in the design and fabrication of lattice structures with complex geometries, allowing their mechanical performance to be functionally optimized. Within this context three-dimensional, symmetric, and original hybrid lattice architecture was developed by integrating auxetic unit cell geometries with body-centered cubic lattice structures, which are distinguished by their high load-bearing capacity and stiffness. The designed hybrid lattice structure was manufactured from polylactic acid (PLA) using the fused deposition modeling (FDM) process, and its mechanical behavior was evaluated through experimental and numerical approaches. Following tensile tests conducted to characterize the material properties, static compression tests were performed on the hybrid lattice unit cell structures. The finite element analyses were validated through comparison with the experimental findings, and the deformation mechanisms, energy absorption behavior, and Poisson's ratio responses were examined in detail using finite element simulations. Furthermore, two gradient lattice designs with different stepwise density distributions were developed to enhance the performance of the hybrid lattice structure. The mechanical responses of these gradient configurations were comparatively evaluated against those of the regular hybrid lattice system. The results indicate that gradient lattice structures provide a more balanced and controlled mechanical performance between energy absorption and structural strength compared to the uniform hybrid lattice system.

Science Code	:	91448
Key Words	:	Hybrid lattice structure, auxetic, body-centered cubic, energy absorption, finite element solution
Page Number	:	131
Supervisor	:	Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve yüksek lisans öğrenimim boyunca yol gösteren ve tecrübeleriyle beni yönlendiren hocam Sayın Prof. Dr. Olcay Ersel CANYURT ve iş hayatında gösterdikleri desteklerinden ötürü Sayın Latif Aykut SÜMER, Sayın Utku YURTSEVER'e, Sayın Emre GÜNGÖR'e ve sevgili aileme teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca desteğini eksik etmeyen çalışma arkadaşlarıma ve tez süresi boyunca mühendislik programlarının (LS-DYNA, ANSYS-FLUID) kullanılması izin verdiği için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'sine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 9

2.1. Üretim Yönetimlerinin Kafes Yapıların Mekanik Özelliklere Etkisi 10

2.2. Malzemenin Kafes Yapılarının Mekanik Davranışlarına Etkisi 11

2.3. Kiriş Tabanlı Kafes Yapılarının Mekanik ve Dinamik Davranışları 12

2.4. Öksetik Kafes Yapıları ve Uygulamaları 16

2.5. Fonksiyonel Gradyan (FG) ve Hibrit Kafes Yapı Tasarımları 19

2.6. Kafes Yapıların Özel Fonksiyonları ve Uygulama Alanları 27

3. KAFES YAPILARI 31

3.1. İki Boyutlu (2B) Kafes Yapılar 36

3.2. Üç Boyutlu (3B) Kafes Yapılar 39

3.2.1. Kiriş tabanlı kafes yapıları 40

3.2.2. Plaka tabanlı (Plate-based) kafes yapıları 40

3.2.3. Yüzey tabanlı (Sheet-based) kafes yapıları 41

3.2.4. Hiyerarşik kafes yapıları 42

3.3. Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri 43

4. EKLEMELİ İMALAT (Eİ) 49

Sayfa

5. MATERYAL VE YÖNTEM 51
6. ANALİZ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR 57
6.1. Hibrit Hücre Konsept Tasarımı 57
6.2. Deneysel Çalışma 59
6.2.1. Çekme testi 60
6.2.2. Basma testi 64
6.3. Analitik Çalışmalar 67
6.3.1. Çekme testi 70
6.3.2. Basma testi 75
6.3.3. Ölçeklendirilmiş kafes yapısı 84
6.4. Hibrit Kafes Sistemi 86
6.5. Gradyan Hibrit Kafes Yapısı 95
6.5.1. Birinci gradyan hibrit kafes yapısı 96
6.5.2. İkinci gradyan hibrit kafes yapısı 104
7. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI 113
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 121
KAYNAKLAR 123
ÖZGEÇMİŞ 131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Creality K1 Max 3 boyutlu yazıcı teknik özellikleri 51

Çizelge 5.2. INSTRON 5582 test cihazı teknik özellikleri..... 53

Çizelge 5.3. 0,3 mm ağ yapısına göre ağ boyutunun yüzdesel değişimi 55

Çizelge 6.1. Çekme Testi Belirsizlik Bileşenleri..... 63

Çizelge 6.2. Basma Testi Belirsizlik Bileşenleri 66

Çizelge 6.3. LS-DYNA MAT_24 Malzeme Kartı Değerleri..... 72

Çizelge 6.4. DEFINE_CURVE için seçilmiş hareket eğrisinin temsil edici noktaları... 74

Çizelge 7.1. Kafes yapılarına ait taşıyıcı kiriş gerilim ve gerinim değerleri 115

Çizelge 7.2. Kafes yapıları kütle karşılaştırılması 117

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Kafes sistemi sınıflandırması 36

Şekil 3.2. İki boyutlu kafes geometrileri: (a) Kagome kafes yapısı, (b) Üçgen balpeteği (c) Altıgen (balpeteği) 37

Şekil 3.3. Üç boyutlu kafes yapısı birim hücre örnekleri 39

Şekil 3.4. Kiriş tabanlı kafes yapıları: a) Gövde merkezli kübik, b) Z takviyeli gövde merkezli kübik, c) Yüzey merkezli kübik, d) Z takviyeli yüzey merkezli kübik, e) Kübik, f) Oktet-kiriş ve g) Kristal 40

Şekil 3.5. Hibrit plaka kafes yapılarının şematik gösterimi 41

Şekil 3.6. Yüzey tabanlı kafes yapısı örnekleri a) Schwarz elmaz, b) Schoen Gyroid, c) Schoen IWP ve d) Schwarz Primitive 42

Şekil 3.7. Hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan kafes yapısı 43

Şekil 5.1. Tez çalışmasında kullanılan 3 boyutlu yazıcı 51

Şekil 5.2. INSTRON 5582 test cihazı 53

Şekil 5.3. Kuvvetin ağ boyutuma göre değişimi 55

Şekil 6.1. Öksetik hücre geometrisi 57

Şekil 6.2. Öksetik yapı tasarımı a) Üst görünüm, b) İzotropik görünüm 58

Şekil 6.3. Gövde merkezli kübik tasarımı 58

Şekil 6.4. Hibrit kafes tasarımı a) Ön görünüm, b) Yan görünüm ve c) İzotropik görünüm 59

Şekil 6.5. Çekme testi numuneleri 60

Şekil 6.6. Çekme testi düzeneği 61

Şekil 6.7. Çekme testi numunelerinin kuvvet- yer değiştirme eğrisi 62

Şekil 6.8. Çekme testi numuneleri gerilim-gerinim eğrisi ve literatür karşılaştırılması 63

Şekil 6.9. Test numuneleri (Hibrit birim kafes yapısı) 64

Şekil 6.10. Basma test düzeneği 65

Şekil 6.11. Basma testi sonucu kuvvet- yer değiştirme eğrisi 66

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.12. PLA malzemesinin gerçek gerilim- gerinim eğrisi..... 68

Şekil 6.13. LS-DYNA etkin gerilim eğrisinin açıklanması 70

Şekil 6.14. Çekme testi numunesi sonlu elemanlar modeli ve başlangıç-sınır koşulları 70

Şekil 6.15. PLA malzemesi davranış eğrisi (DEFINE_CURVE Kartı)..... 71

Şekil 6.16. PLA malzemesi LS-DYNA için oluşturulan gerçek gerilim-gerinim eğrisi 72

Şekil 6.17. LS-DYNA yükleme eğrisi 73

Şekil 6.18. LS-DYNA hareket kartı örneği 73

Şekil 6.19. Çekme testi sırasında numunenin farklı yükleme adımlarındaki eksenel gerilme dağılımı: a) Yükleme öncesi, b) Elastik bölge sonu – boyun verme başlangıcı, c) Plastik deformasyonun ilerlediği son durum..... 74

Şekil 6.20. Hibrit yapı sonlu elemanlar analizi ve test karşılaştırma eğrisi..... 75

Şekil 6.21. Hibrit birim kafes yapısı sonlu elemanlar modeli..... 76

Şekil 6.22. LS-DYNA etkileşim (CONTACT) kartı tanımlaması..... 77

Şekil 6.23. Reaksiyon kuvveti karşılaştırılması..... 78

Şekil 6.24. Etkin gerilim- gerinim eğrilerinin karşılaştırılması 79

Şekil 6.25. Birim hibrit kafes yapısının hacimsel görünümü..... 80

Şekil 6.26. Düşey sıkıştırma boyunca yapıda elde edilen Poisson oranının vxy, düşey gerinim εy ile değişimi..... 83

Şekil 6.27. Düşey sıkıştırma boyunca yapıda elde edilen Poisson oranının vzy, düşey gerinim εy ile değişimi..... 84

Şekil 6.28. Ölçeklendirilmiş model ile tam ölçekli model Etkin gerinim-gerilim karşılaştırılması..... 86

Şekil 6.29. Düzenli kafes yapısı sonlu elemanlar modeli a) x-y düzlemi, b) z-y düzlemi, c) izotropik görünüm 87

Şekil 6.30. Düzenli hibrit kafes yapısının etkin gerilim- gerinim grafiği..... 88

Şekil 6.31. Düzenli hibrit kafes yapısının hacim oranı..... 89

Şekil 6.32. Düzenli hibrit kafes sistemi kuvvet- yer değiştirme eğrisi 89

Şekil 6.33. Düzgün hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi 91

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.34. Düzgün hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi 92

Şekil 6.35. Düşey sıkıştırma boyunca x yönündeki Poisson oranı değişimi 93

Şekil 6.36. Düşey sıkıştırma boyunca z yönündeki Poisson oranı değişimi..... 93

Şekil 6.37. Hibrit kafes yapının basma yükü altındaki üç farklı deformasyon seviyesinde gerilme (sol) ve etkin plastik gerinim (sağ) dağılımlarının karşılaştırılması: a-f) elastik bölgedeki davranış seviyesi, b-e) plastik deformasyonun başladığı orta deformasyon seviyesi, c-f) lokal gerilme birikimi ve plastik deformasyon 94

Şekil 6.38. Düzenli hibrit kafes yapısının orta katmanı plastik deformasyonu 95

Şekil 6.39. Birinci gradyan hibrit kafes sistemi tasarımı: a) z-y düzlemi, b) x-y düzlemi 97

Şekil 6.40. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının yer değişmeye göre reaksiyon kuvvet eğrisi 98

Şekil 6.41. Birinci gradyan kafes yapısının etkin gerilimi gerinim eğrisi 99

Şekil 6.42. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi 100

Şekil 6.43. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi 100

Şekil 6.44. Birinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca x yönlü Poisson oranının değişimi 101

Şekil 6.45. Birinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca z yönlü Poisson oranının değişimi 102

Şekil 6.46. Birinci gradyan hibrit yapının deformasyon şekilleri: a) ilk deformasyon, b) Orta deformasyon, c) İleri deformasyon 103

Şekil 6.47. İleri plastik aşaması: a) Gerilim yayılımı, b) plastik gerinim yayılımı..... 104

Şekil 6.48. İkinci gradyan hibrit kafes sistemi tasarımı: a) z-y düzlemi, b) x-y düzlemi 105

Şekil 6.49. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının kuvvet- yer değiştirme eğrisi 106

Şekil 6.50. İkinci gradyan hibrit yapısının etkin gerilme gerinim eğrisi 107

Şekil 6.51. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının basma yükü altında a) Başlangıç deformasyon, b) orta deformasyon, c) ileri deformasyon..... 108

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.52. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının basma yükü altında kiriş bazlı a) başlangıç defromasyonu, b) orta deformasyon, c) ileri deformasyon 109

Şekil 6.53. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi 110

Şekil 6.54. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi 110

Şekil 6.55. İkinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca x yönlü Poisson oranının değişimi 111

Şekil 6.56. İkinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca z yönlü Poisson oranının değişimi 112

Şekil 7.1. Hibrit kafes yapılarının kuvvet- yer değişimi 113

Şekil 7.2. Hibrit kafes yapılarının etkin gerilim- gerinim karşılaştırılması 114

Şekil 7.3. Hibrit yapıların düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme değerleri 116

Şekil 7.4. Hibrit kafes yapılarının düşey sıkıştırma boyunca Poisson Oranı (vxy) karşılaştırılması 118

Şekil 7.5. Hibrit kafes yapılarının düşey sıkıştırma boyunca Poisson Oranı (vzy) karşılaştırılması 118

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Alan (mm2)
d	Kiriş çapı (mm)
E	Elastik modülü (MPa)
E*	Kafes yapısının Elastik modülü (MPa)
F	Eksenel kuvvet (N)
g	Gram
Hz	Hertz
I	Birim hücre kenar uzunluğu (mm)
J	Joule
kg	Kilogram
L	Uzunluk (mm)
m	Kütle (kg)
mm	Milimetre
mm^2	Milimetrekare
mm^3	Milimetreküp
MPa	Mega Pascal
r	Kiriş yarı çapı (mm)
s	Zaman (saniye)
u	Yer değiştirme (mm)
V	Hacim (mm3)
$\Delta \boldsymbol{h}(\boldsymbol{s})$	Eksenel uzamanın zaman bağlı değişimi (mm)
ε	Birim şekil değişimi (-)
ν	Poisson oranı
ρ	Malzemenin yoğunluğu (kg/mm3)
ρ*	Kafes yapısının bağıl yoğunluğu (kg/mm3)
σ	Akma gerilmesi (MPa)
σ*	Kafes yapısının akma gerilmesi (MPa)

Simgeler	Açıklamalar
σ_y	Kopma gerilmesi (MPa)
A_0	Yükleme başındaki kesit alanı (mm2)
$E_{toplams}$	Malzemenin Elastik modülü (MPa)
$F(s)$	Zamana bağlı eksenel kuvvet (N)
F_{max}	Maksimum basma kuvveti (N)
V_{kafes}	Gözenekli kafes yapısının hacmi (mm3)
V_{toplam}	Toplam hacim (mm3)
h	Yapının ilk eksenel uzunluğu (mm)
ε_{etkin}	Kafes yapısının etkin birim şekil değişimi (-)
ε_x	X yönündeki birim şekil değişimi (-)
ε_y	Y yönündeki birim şekil değişimi (-)
ε_z	Z yönündeki birim şekil değişimi (-)
ν_{xy}	X-Y yönleri arasındaki Poisson oranı
ν_{zy}	Z-Y yönleri arasındaki Poisson oranı
σ_{etkin}	Kafes yapısının etkin gerilmesi (MPa)
λ	Boyutsal ölçeklendirme kat sayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
AM	Eklemeli imalat
ASTM	Amerikan Test ve malzeme standartları kurumu
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
EA	Enerji sönümleme (J)
EBM	Elektron ışını ergitme (Elektron beam Melting)
FDM	Ergiterek yığma modelleme (Fused Deposition Modeling)
FEA	Sonlu elemanlar analizi (Finite Element Analysis)
FG	Fonksiyonel gradyan
GMK	Gövde merkezli kübik (Body-centered Cubic)
GMK-z	Z yönünden destekli gövde merkezli kübik
ÖZS	Özgül enerji sönümleme (J/kg)
PLA	Poliaktik Asit

Kısaltmalar	Açıklamalar
SEA	Özgül enerji sönümleme (J/kg)
SLM	Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting)
TPMS	Üç periyodik minimal yüzey (Triply Periodic Minimal Surface)
UTS	Nihai çekme dayanımı (Ultimate Tensile Strength)
YMK	Yüzey merkezli Kübik (Face-centered Cubic)

1. GİRİŞ

Otomobil ve hava araçlarının tasarımları başta olmak üzere modern mühendislik projelerinde yapısal hafiflik en önemli hedeflerden biri olarak kabul edilmektedir. Yapısal hafiflik için kütle azaltımı sağlanırken, yapıdaki mukavemet kayıplarının önlenmesi tasarım çalışmaları için bir sınır şartı oluşturmaktadır. Bu sınır şartlarının yanı sıra, yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar, yeni yapısal tasarım arayışlarını başlatmıştır.

Geleneksel yapısal tasarımların ötesinde, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte eklemeli imalat (additive manufacturing) teknolojilerinin gelişimi, farklı tasarım olanaklarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi karmaşık ve yüksek maliyetlerde olan yapılar, eklemeli imalat yöntemleri aracılığıyla daha kolay ve daha ekonomik koşullarda üretilebilmektedir. Bu kolaylık nedeniyle eklemeli imalat yöntemleri tasarım gereksinimlerini daha hızlı, daha ekonomik ve daha sürdürülebilir bir üretim yöntemi seçeneği sunmuştur.

Bu gelişmelerle birlikte, gözenekli yapılar son yıllarda dikkat çeken alternatif yapısal çözümlerden biri hâline gelmiştir. Hafiflik gereksinimi karşılanırken, gözenekli tasarımlar yapısal mukavemeti iyileştirme potansiyeli de taşımaktadır. Bu yapılar, mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sunduklarının yanı sıra enerji sönümleme oranını artırarak makine ömrünü uzatmakta, bakım ve onarım süreçlerini kolaylaştırmakta ve çalışma performansını geliştirecek yeni mühendislik çözümlerinin önünü açmaktadır.

Biyomimetik yaklaşımlarla elde edilen böcek kabukları ve kemik dokusu gibi doğal gözenek yapılar mekanik verimlilik, insan vücuduna uyum ve işlevsellik açısından dikkat çekmektedir. Mühendislik uygulamalarında ise inşaat sektöründe, biyomekanik mühendisliğinde stent uygularında, hava araçlarında, spor ekipmanları ve ayakkabı tabanlıklarına kadar geniş bir kapsamda kullanılmaktadır. Gözenek yapılar, doğadaki örneklerinde rastgele biçimde bulunabildiği gibi, mühendislik uygulamalarında yarı düzenli veya tamamen düzenli biçimlerde tasarlanabilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu malzeme çeşitliği sayesinde, farklı malzemelerden ve farklı tasarım parametrelerinden oluşan neredeyse sınırsız gözenekli yapı oluşturulması mümkündür.

Literatürde gözenekli ve kafes yapılar üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bir kısmı tek tip hücre geometrisine sahip periyodik yapılara odaklanmaktadır. Özellikle, enerji sönümleme kapasitesi ile yapısal rijitliğin aynı anda optimize edilmesi konusu yeterince araştırılmamıştır. Çoğu araştırma yalnızca mukavemetin artırılması veya ağırlığın azaltılması üzerine yoğunlaşmakta; ancak bu iki hedefi birlikte sağlayabilecek hibrit kafes yapıların davranışı sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca, öksetik (negatif Poisson oranlı) ve gövde merkezli kübik (body-centered cubic, BCC) gibi farklı hücre topolojilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit geometrilerin deneysel ve nümerik doğrulama çalışmaları literatürde oldukça kısıtlıdır. Bu bağlamda, üretilebilirliği yüksek, dayanım ve enerji emme performansı iyileştirilmiş hibrit kafes sistemlerinin tasarımı, hâlâ bilimsel çalışmalar için dikkat çeken bir araştırma başlığıdır.

Bu tez çalışmasında, gözenekli yapıların farklı gruplandırmaları ele alınacak olup, ana odak noktası düzenli gözenek yapıları olan kafes (lattice) yapılar üzerine olacaktır. Özellikle öksetik ve gövde merkezli kübik hücrelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit kafes yapıların mekanik performansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi hedeflenmektedir.

Konunun tanımı

Gözenekli yapılar, hücre yapılarına, dizilim biçimlerine ve geometrik şekillerine göre farklı kategorilerde sınıflandırılabilmektedir. Farklı gruplandırmalar yapılmış olsa da tüm kafes yapıların temel amacı; enerji emilimini artırmak, mukavemeti güçlendirmek, termal iletimi iyileştirmek ve kütle yoğunluğunu azaltmaktır. Bu hedefler doğrultusunda, mikro ölçekten makro ölçeğe kadar literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Kafes yapılarda yapılan mikro geometrik değişimlerin mekanik performans üzerine belirleyici olduğu görülmüştür (Zhao ve diğerleri, 2022). Örnek olarak, farklı kiriş kesitlerinin ve hücre geometrisi yapısal davranışı önemli ölçüde etkilemiştir (Ghahramanzadeh Asl, Altıntaş Kahriman ve Karaman, 2023). Bu potansiyel, araştırmacıların farklı geometriler ve hücre tipleri üzerinde yoğunlaşarak mekanik performans optimizasyonuna yönelik çeşitli çalışmalar yapmasına zemin hazırlamıştır.

Tek tip hücre yapılarında sağlanan bu gelişmelere karşın, gözenekli yapılar, tekil formlarında genellikle yalnızca belirli bir mekanik özelliği iyileştirirken, iki veya daha fazla farklı özellikteki gözenek yapıların bir araya getirilmesiyle mekanik performansın daha da

güçlendirilmesi mümkündür. Bu yapılar, literatürde hibrit kafes yapıları olarak adlandırılmaktadır. Hibrit kafes yapıların, tekil kafes yapılarına göre daha dengeli mekanik performans sunması, dayanım ve enerji sönümlemesi açısından belirgin bir avantaj sağlamıştır (Rahimi ve Asghari, 2025;Zhang, Huang, Liu, Zong ve Zhang, 2021). Bu sayede yeni hibrit tasarım yaklaşımları ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, yoğunluğu katmanlar boyunca kademeli olarak değişen hibrit kafes yapılarda yük dağılımının iyileştiği ve global deformasyonun daha kontrollü yapıldığı görülmüştür (Xu, Razavi ve Ayatollahi, 2023; Noronha ve diğerleri, 2023).

Bununla birlikte, geleneksel imalat yöntemleri bu yapıların üretimini oldukça zorlaştırmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinin kullanım alanlarının genişlemesi, gözenekli yapıların araştırılmasını daha da popüler hâle getirmiştir. Gözenekli geometriler, karmaşık geometrilerine rağmen katmanlı imalat yöntemleriyle üretimi daha hızlı, daha ekonomik ve kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi, farklı malzemelerle üretim olanağının olması gözenekli yapıların tasarım parametrelerinde bir esneklik sağlamaktadır. Bu teknolojik gelişme, sadece üretim kolaylığı sunmakla kalmayıp aynı zamanda yapısal performansın deneysel ve sayısal olarak detaylı biçimde incelenmesine de olanak tanımaktadır.

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat yöntemi kullanılarak yeni bir hibrit kafes yapı tasarımı geliştirilmiştir. Son yıllarda ilgi gören öksetik (auxetik) yapılar, darbe etkisi altında yüksek enerji sönümleme kapasiteleriyle dikkat çekmektedir. Bu kapsamda, tezde öncelikle öksetik hücre yapısı esas alınmış; bu yapının içerisine yerleştirilen gövde merkezli kübik (GMK) hücreler aracılığıyla yapısal rijitliğin artırılması hedeflenmiştir. Böylece, farklı mekanik özelliklere sahip iki farklı kafes yapısı bir araya getirilerek özgün bir hibrit kafes yapı oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, yalnızca dayanım ve enerji emilimi arasındaki dengeyi iyileştirmeyi değil, aynı zamanda tasarım esnekliğini de genişletmeyi amaçlamaktadır.

Oluşturulan hibrit kafes yapısının mekanik özelliklerinin belirlenmesinin ardından, bu yapının gradyan kafes sistemi olarak türetilmesi hedeflenmiştir. Gradyan hibrit kafes sisteminin tasarımında, hibrit yapıdaki baskın hücre yapısının etkinliğini görmek amacıyla iki farklı gradyan hibrit kafes tasarımı hazırlanmıştır. Birinci gradyan hibrit kafes yapısında öksetik yapı özellikleri sabit tutulmuş; GMK yapısının hacim yoğunluğu kademeli olarak değiştirilmiştir. İkinci gradyan hibrit kafes yapısında ise iki hücre yapı özellikleri aynı

tutularak katman boyunca değişimi ile elde edilmiştir. Böylelikle, dinamik yükler altında hem hibrit hem de farklı gradyan hibrit kafes yapıların mekanik performansı ve enerji sönümleme davranışlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşımla, yalnızca iki farklı kafes tipinin birleştirilmesi değil, aynı zamanda malzeme dağılımındaki kademeli geçişlerin mekanik davranış üzerindeki etkilerinin de araştırılması hedeflenmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak hem hibrit hem de gradyan geçişli özgün bir kafes yapı tasarımı ortaya konmuş; elde edilen yapının mekanik ve enerji sönümleme performansının bütüncül biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın amaç ve hedefleri

Mühendislik çalışmaların temel amacı yüksek dayanım ve mekanik performans sağlarken düşük ağırlıktaki tasarımlardır. Ancak mevcut yapısal tasarımlarda bu üç kriterin aynı anda sağlanması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Özellikle enerji sönümleme kapasitesi yüksek yapılar genellikle düşük sertliğe sahiptir. Yüksek sertliğe sahip yapılar ise darbe altında gevrek davranış sergileyebilmektedir. Bu çelişki, mühendislik yapılarında hem dayanım hem de enerji sönümleme açısından yeni yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

Eklemeli imalat (additive manufacturing) teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, kafes yapılar (lattice structures) bu gereksinimleri karşılayabilecek yenilikçi çözümlerden biri olarak öne çıkmıştır. Özellikle öksetik hücre geometrileri ve gövde merkezli kübik (GMK) kafes yapıları, enerji sönümleme, darbe dayanımı ve kontrollü deformasyon davranışı gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedir.

GMK kafes yapılar, düzenli geometrik simetrileri ve parametrik tasarım kolaylıkları sayesinde yaygın biçimde tercih edilen yapılardır. İzotropik mekanik davranış sergiledikleri için çok yönlü yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Ayrıca yüksek özgül mukavemetleri sayesinde hafiflik ve dayanım gerektiren uygulamalarda ön plana çıkarlar. Üretim yöntemlerinde geleneksel imalat yöntemleriyle üretilebildikleri gibi eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu olanaklar, ile GMK yapıların üç boyutlu yazıcılarla yüksek

doğrulukta üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, bu tür kafeslerde ince ve uzun kirişlerin yüksek yükler altında burkulma riski taşıması, enerji sönümleme kabiliyetinin sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu kısıtlamaları aşmak için öksetik davranış gösteren yapılar alternatif bir çözüm olarak öne çıkmıştır.

Öksetik yapılar, geometrik tasarımlarından kaynaklı eksenel yük altında yanal genişleme eğilimi göstermesi sebebiyle negatif Poisson oranı oluşturan yapılardır. Bu benzersiz mekanik tepki, darbe altında yüksek enerji sönümleme ve deformasyon artışı sağlamaktadır. Öksetik kafesler, elastik deformasyon yetenekleri ve şekil değişimine uyumlu davranışları nedeniyle biyomedikal implantlar, koruyucu ekipmanlar ve darbelere dayanıklı mühendislik sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak öksetik yapılarda yük taşıma kapasitesi sınırlı kalmaktadır. Bu sebepten dolayı mukavemet değerleri düzenli geometrik kafes yapıları örneğin gövde merkezli kübik, hacim merkezli kübik yapı gibi yapılara göre daha düşüktür. Ayrıca, karmaşık geometrik yapıları nedeniyle geleneksel ya da eklemeli imalat ile üretim sırasında bazı zorluklarla karşılaşılabilmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, öksetik yapıların enerji sönümleme kapasitesiyle GMK kafes yapılarının taşıma dayanımını bir araya getiren hibrit bir kafes yapı tasarımı geliştirmektir. Bu hibrit yaklaşımda, GMK yapının sertlik ve yük taşıyıcı karakteri ile öksetik yapının deformasyona uyumlu, darbe sönümleyici özellikleri birleştirilmiştir. Böylelikle, bir kafes yapısının olumsuz özelliği diğer bir kafes yapısı ile kapatılarak aynı yapı içinde yüksek mukavemetli ve yüksek enerji emilimi karakteri sağlayan çok işlevli (multi-functional) bir kafes mimarisi elde edilmiştir.

Öksetik ve GMK yapıların birlikte değerlendirildiği çalışmaları literatür nadiren araştırılmıştır. Çoğu araştırma bu iki yapıyı beraber etkileşimlerini değil, iki bağımsız kafes yapısı olarak incelenmiştir. İki kafes yapısının beraber etkileşimi ile gerçekleştirilen hibritleştirme yaklaşımları ise çoğunlukla aynı tip kafes sistemlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur (Rahimi ve Asghari, 2025). Ayrıca mevcut hibrit çalışmalarda genellikle geometrik entegrasyondan aksine hücre parametrelerinin sayısal değişimi araştırılmıştır. Bu durum, yapısal bütünlüğü koruyan gerçek bir hibrit kafes sisteminin eksikliğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bir diğer özgün yönü, iki kafes yapının birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit kafes sistemi sadece düzenli hibrit kafes sistemi olarak değerlendirilmemesidir. Düzenli hibrit kafes yapısına ek olarak fonksiyonel optimizasyonu hedefleyen, görev odaklı bir tasarım yaklaşımını çalışılmıştır. Bu fonksiyonel optimizasyon hedefi için GMK kafes geometrisi üzerinde kademeli yoğunluk değişimi (gradyan mimari) uygulanarak yapı farklı katmanlara ayrılmıştır. GMK kafes geometrisinin değişimine ek olarak öksetik yapının kademli yoğunluk değişimi eklenerek ikinci bir fonksiyonel optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, hem öksetik–GMK kafes yapıların yapısal olarak birleştirilmesi hem de katmanlar arası yoğunluk değişiminin iki farklı tasarım ile değişimi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar ile yük aktarımı ve deformasyonun kademeli olarak dağılmasını sağlayarak daha dengeli ve kararlı bir mekanik davranış elde edilmesi amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasının amaçları; öksetik ve BCC kafes yapıların entegrasyonuna dayalı hibrit ve gradyan geçişli bir kafes sisteminin tasarımını ve bu sistemin mekanik performansının deneysel ve nümerik yöntemlerle değerlendirilmesidir. Geliştirilen bu özgün yapı ile hem enerji sönümleme hem de yük taşıma özelliklerinin aynı yapı içerisinde optimize edilmesi amacıyla tez çalışması farklı deneysel ve nümerik sonuçlar ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasının hedefleri şu şekilde özetlenmiştir:

- Öksetik etki gösterecek öksetik hücre geometrisinin oluşturulması,
- Öksetik hücre geometrinin köşegenlerine gelecek şekilde gövde merkezli kübik yapının yerleştirilmesi ve nihai hibrit yapının oluşturulması,
- Üretim malzemesin ve yöntemi uygum numunelerin hazırlanması ve üretilmesi,
- Analitik modelleme için üretim malzemesi olan PLA filament malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testlerinin yapılması,
- Aynı üretim sürecinde ve malzemede birim hibrit kafes yapısının üretilmesi,
- Birim hibrit kafes yapısın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için statik basma testlerinin gerçekleştirilmesi,
- Sonlu elemanlar analizi ile malzeme modelinin deneysel verilerle doğrulanması,
- Doğrulanan malzeme modeliyle ile birim kafes yapıların sonlu elemanlar çözümlerinin gerçekleştirilmesi ve deneysel veriler ile doğrulanması,
- Aynı gözenek çapı ve payanda kalınlığına sahip olacak şekilde periyodik (tekdüze) 3x3x3 hibrit kafes sistemi oluşturulması,

- Gövde merkezli kübik kafes yapısının her bir katman için yarıçaplarının kademeli olarak değiştirilmesiyle birinci gradyan hibrit kafes sisteminin oluşturulması,
- Gövde merkezli kübik yapı ile aynı oranda öksetik kafes yapısının yarıçaplarının değiştirilmesi ile ikinci gradyan kafes sisteminin oluşturulması,
- Oluşturulan üç kafes sisteminin birim hibrit kafes yapısı temel alınarak sonlu elemanlar çözümlerinin yapılması,
- Makro ölçekte oluşturulan hibrit kafes sistemlerinin genel mekanik performansının incelenmesi,
- Oluşturulan hibrit kafes sistemlerinin enerji sönümleme kapasitesi ve yük taşıma performansının birbirleri ile değerlendirilmesi,

Araştırmanın önemi

Kafes yapılarında hücre geometrisi, malzeme yoğunluğu dağılımı ve üretim tekniği, mekanik davranışı ve enerji sönümleme kapasitesi üzerinde güçlü etkiler yaratmaktadır. Geleneksel modeller, sabit yoğunluklu kafes sistemlerine dayanırken, fonksiyonel gradyan yapıların analizi için daha gelişmiş modellere ihtiyaç vardır. Literatürdeki modifiye Gibson-Ashby modeli, gradyan kafes yapılarına uygulanan analizleri iyileştirerek bu açığı kapatmaya çalışmaktadır. Bunun yanı sıra hibrit kafes yapılar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, farklı hücre geometrilerinin birleştirildiği sistemlerin hem mekanik performans hem de enerji absorpsiyon açısından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışması, literatürde ayrı ayrı incelenen öksetik (negatif Poisson oranlı) ve GMK kafes yapılarını birleştirerek çok işlevli hibrit bir yapı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Öksetik yapıların yüksek deformasyon toleransı ve enerji sönümleme yeteneği ile GMK yapıların sertlik ve yük taşıma karakteristikleri bir araya getirmiştir. Oluşturulan yapı hem mekanik performansı hem de enerji absorpsiyon kapasitesini dengeli biçimde optimize etmeyi hedefler. Ayrıca, bu çalışma kademeli yoğunluk (gradyan) tasarım stratejisi kullanarak yapı içinde bölgesel mukavemet değişikliklerini kontrollü biçimde tanımlar. Bu yaklaşım gerek dayanım gerekse malzeme verimliliği açısından avantaj sağlayabilir.

Sonuç olarak, tez çalışması öksetik ile GMK kafes yapıların avantajlarını birleştiren, gradyan geçişli hibrit kafes yapı tasarımı önerir. Bu yapı, enerji sönümleme kapasitesi ile mekanik dayanım arasındaki optimum dengeyi sağlamayı hedeflerken, üretilebilirliği ve uygulama

potansiyelini de korur. Bu yönüyle çalışma, hibrit ve gradyan kafes sistemleri alanındaki araştırma eksikliğine katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Sınırlılıklar

Bu tez çalışmasında geliştirilen hibrit kafes yapısı, Erimiş Tel Yığma (Fused Deposition Modeling, FDM) yöntemiyle üretilmiştir. Bu yöntem, karmaşık geometrilerin ekonomik ve hızlı bir biçimde üretilmesine olanak tanısa da özellikle yuvarlatılmış köşe veya geçişe sahip bölgelerde ve ince çubuk elemanların bulunduğu kısımlarda geometrik hassasiyetin azalması ve yüzey pürüzlülüğünün artması gibi sınırlamalar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, üretim sonrasında yüzey düzeltme veya boyutsal iyileştirme işlemlerinin uygulanması gerekmekte olup, bu durum çalışmanın temel sınırlılıklarından birini oluşturmaktadır.

Ayrıca kullanılan Polilaktik Asit (Polylactic Acid, PLA) malzemenin termomekanik özellikleri ve FDM yöntemine özgü katmanlı (anisotropik) üretim karakteri, yapının yönsel dayanım farklılıklarına yol açabilmektedir. Bu durum, elde edilen mekanik verilerin genelleştirilebilirliğini kısmen sınırlandırmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan numune sayısının sınırlı olması ve yalnızca tek eksenli statik basma (uniaxial compression) koşullarının incelenmesi de yapının farklı yükleme senaryoları altındaki davranışlarının değerlendirilmesini kısıtlamaktadır.

Sayısal analizlerde kullanılan malzeme modeli ve sınır koşulları, belirli ideal varsayımlar içermektedir. Üretimden kaynaklanan mikro boşluklar, katman yapışma kusurları veya yüzey hataları gibi parametreler analiz modeline tam olarak dâhil edilememiştir. Bu nedenle, deneysel sonuçlar ile sayısal analiz çıktıları arasında belirli bir farkın oluşması beklenebilir ve bu farklar, kabul edilebilir mühendislik toleransları çerçevesinde değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mühendislik uygulamaları çok geniş bir kapsama sahiptir. Fakat her mühendislik alanında daha hafif ve daha verimli yapısal tepkiler verilmesi için çalışılmıştır. Bu sebeple yenilik tasarım yaklaşımları gün ve gün artmaktadır. Kafes yapıları ise bu isterleri kapsayacak yeterlikte olan, son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Diğer yapılara göre bu yapıların üretim kolaylığının olması araştırmacılar için daha hızlı analiz ve deney imkânı oluşturması sebebiyle de önem kazanmıştır. Özellikle eklemeli imalat yöntemleri ile kafes yapıların üretilebilme kolaylığının ve üretim maliyetlerinin düşüklüğü araştırmacıları daha karmaşık kafes yapıların araştırılmasına, fonksiyonel gradyan ve hibrit kafes yapı tasarımlarına olan ilginin artmasını sağlamıştır.

Literatürdeki çalışmaların büyük bir bölümü tek bir kafes topolojisine odaklanmakta veya belirli mekanik performans kriterini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Araştırmacılar bu boşluğu kapatmak için kafes yapıların farklı topolojiler ile birleştirmiş, farklı geometrik veya malzeme değişikleri ile fonksiyonel derecelendirmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Hibritleştirme ve fonksiyonel derecelendirme ilkesi içerisinde, öksetik yapılar farklı topolojilerle birleştirilerek yapının mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise daha önce yapılmayan farklı, tamamen simetrik, üç boyutlu öksetik yapının enerji sönümleme kapasitesi ile gövde merkezli kübik yapının yük taşıma kapasitesini bir araya getiren yeni bir tasarım ortaya konmuştur. Eriyik yığma modelleme (FDM) yöntemiyle üretilen, öksetik–GMK hibrit geometriye sahip bu yapı, iki farklı kademeli yoğunluk değişimi uygulanarak yeni fonksiyonel gradyan kafes sistemine dönüştürülmüştür. Yapılan çalışma, literatüre hem yeni bir tasarım hem de fonksiyonel derecelendirmenin mekanik performans üzerinde etkisini bütüncül bir bakış açısı ile atmaktadır.

Havacılıkta kullanılan hafif kafes yapıların tasarımında eklemeli imalat teknolojilerinin rolünü kapsamlı bir şekilde inceleyen bir derleme makalesi yayınlamışlardır. 2014-2023 yılları arasında yayımlanmış 848 makalenin 380 tanesi analiz edilmiştir. İncelemeler sonucunda genel olarak kafes yapıların geleneksel yapılara göre daha iyi ağırlık-dayanım oranı sağladığı, farklı kafes tipleri ve yoğunluk gradyanlarının mekanik performansı önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Havacılık alanında uçak parçalarında (örneğin kapı

menteşesi, UAV kanatları) %20-60 arasında ağırlık azaltımı sağlayabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca üretim sınırlamaları, standart eksikliği ve malzeme uyumluluğu gibi zorlukların çözülmesi gerektiği vurgulanmıştır (Khan ve Riccio, 2024). Bu genel tablo, kafes yapıların performansını belirleyen ana değişkenlerin (hücre geometri ailesi, bağıl yoğunluk/ gradyan, üretim tekniği) ayrı ayrı incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu sebeple, literatürde taraması konun daha bütüncül anlatılabilmesi için beş farklı alt başlığa ayrılmıştır.

2.1. Üretim Yönetimlerinin Kafes Yapıların Mekanik Özelliklere Etkisi

Katmanlı üretim teknikleri, karmaşık kafes yapıların pratik şekilde üretilebilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sebeple katmanlı imalat yöntemlerin yapılar üzerine etkisi araştırmacıların dikkati çekmiştir. Selektif lazer sinterleme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemiyle üretilen Al-Si10-Mg alaşımı kafes yapılarının mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmanın amacı, özellikle fonksiyonel gradyan ve sabit yoğunluklu (uniform) kafes yapıların mekanik özelliklerini ile enerji emme davranışlarını karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda yapıların ısıl işleme tabi tutulmuş ve tutulmamış hâlleri de karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, uygulana ısıl işlemin yapısal performansı olumlu yönde etkilediğini göstermiştir (Maskery ve diğerleri, 2016). SLM ile elde edilen bulgular, farklı ergitme süreçlerinin (ör. EBM) dinamik yük altındaki tepkileri nasıl etkilediğini sorgulamayı da teşvik etmektedir. Eğilme baskın (bending dominant) bir kafes yapısı olan elmas on iki yüzlü (dodecahedron) elektron ışınlı ergitme (Electron Beam Melting, EBM) ile üretilmiş ve yapının iki farklı konfigürasyonda incelemişlerdir. Bu konfigürasyonlar, hücre boyutları 3 mm ve 5 mm olmak üzere belirlenmiş ve sırasıyla kiriş yarıçapları 0,352 mm ve 0,525 mm olarak seçilmiştir. Numuneler yarı statik ve dinamik sıkıştırma testlerine tabi tutulmuş ve ayrıca nümerik olarak LS-DYNA ile analiz edilmiştir. Çalışmada, yükleme hızındaki değişimlerin, gözenek yapısının dayanım karakteristiği üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Farklı boyutlardaki kafes yapıların mekanik davranışı, şok dalgasının davranışı, geçiş hızı ve Johnson-Cook malzeme modeli ile malzeme davranışı incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre hücre boyutunun artmasının yapıyı deformasyon hızlarına (strain rate) karşı daha duyarsız hale getirdiği belirlenmiştir. Hücre boyutundan bağımsız olarak ilk deformasyonun 45 derece kesme bandında oluştuğu gözlenmiştir. Nümerik çözümlerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Birden fazla deformasyon modunun oluşumu, yalnızca yüksek hız simülasyonlarında gözlenmiştir.

Malzemenin yüzey durumu ve eksenel kusurları, deformasyon modlarını üzerinde belirleyici bir rol oynadığı raporlanmıştır (Xiao ve diğerleri, 2017).

2.2. Malzemenin Kafes Yapılarının Mekanik Davranışlarına Etkisi

Kafes yapıların mekanik davranışları üzerine yapılan araştırmalarda, kullanılan üretim tekniklerinin yanı sıra tercih edilen malzeme türlerinin etkisi de detaylı biçimde incelenmiştir. Katmanlı imalat yöntemlerinde çok kullanılan 316L paslanmaz çelik, Ti-6Al-4V alaşımları ve AlSi10Mg üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Syrlybayev, Yankin, Perveen ve Talamona (2025), AlSi10Mg kafes yapıların mekanik performansını araştırmışlardır. Bunun için dokuz farklı topoloji kullanmışlardır. Çalışmanın tahmin modellerinde, z yönünde güçlendirilmiş gövde merkezli kübik, levha tabanlı gyroid kafes yapısı ve levha tabanlı kristal kafes yapısının gerilme baskın deformasyon gösterirken gövde merkezli kübik ile eşkenar dörtgensel on ikiyüzlü (rhombic dodecahedron) kafes yapısın eğilme baskın deformasyon sergilediği raporlanmıştır. En yüksek mekanik performans levha tabanlı yapılarda edilmiştir. 0,2 bağıl yoğunluğa sahip kristal yapıya sahip levha tabanlı kafes yapısı 603,6 MPa elastik modül ile 21,44 MJ/ m^3 hacimsel enerji soğurma kapasitesi sağlayarak kafes yapılarında arasındaki en üstün değerlere sahip olduğu görülmüştür. AlSi10Mg ile üretilmiş kafes yapıların 316L paslanmaz çeliğe kıyasla daha yüksek özgül dayanım sergilediği görülmüştür. Z. Xie ve diğerleri (2025), nikel esaslı süper alaşımlardan olan IN718 ve IN625 malzemeleri kullanılarak ve SLM yöntemi ile üretilen üç farklı topoloji için hem deneysel hem de nümerik simülasyonlarla incelemişilerdir. Bu yapılar sırasıyla gövde merkezli kübik, ilkel üç periyodik minimal yüzey yapısı (Primitive Three Periodic Minimal Surface Structure, P-TPMS) ve üç boyutlu anti-tetrakiral (Three-dimensional Anti-tetrachiral Structure, 3ATC) yapıdır. Aynı malzemeden üretilen kafes yapıları içinde P-TPMS en yüksek akma değerine sahip iken 3ATC yapı en düşük akma değerine sahip olduğu görülmüştür. IN718 malzemesi kullanılan numunelerde ilkel üç periyotlu minimal yüzey yapının 66,1 MPa akma dayanımına ve 22,1 J/g özgül enerji sönümleme değerine ulaştığı rapor edilmiştir. Yüksek tokluk özelliği ile bilinen IN625 malzemesi özellikle gövde merkezli kübik ve 3ATC yapılarda önemli bir hasar görülmemiştir. Bu sonuçlara ek olarak yüksek deformasyonlar altında stabil davranış sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar, uygulama koşullarına göre malzeme ve geometrik uyumunun performans açısından kritikliği ortaya konmuştur. Berthel ve diğerleri (2025), uygulama gereksinimi olarak plaka tabanlı kafes yapıların yüksek dayanım /ağırlık oranından yararlanılmak istenmiştir. Bu yapıların üretim

zorluklarından kaynaklı olarak sadece lazer toz yataklı ergitip yöntemle metal olarak üretilebilmektedir. Dört farklı birim hücre topolojisine sahip AlSi10Mg malzemesinden lazer toz yataklı ergitme yöntemiyle üretmişlerdir. Yapıların davranışı yarı-statik basma testleri ve mikro-bilgisayar tomografi analizleri ile incelemişlerdir. Çalışma, basit kübik (BK), gövde merkezli kübik (GMK), yüzey merkezli kübik (YMK) ve kabuklu giroid (Shell Gyroid) topolojilerini ele almıştır. Mikro-bilgisayar analizleri, yüzey pürüzlüğü ve ergime kaynaklı kusurların mekanik tepkiyi belirgin bir şekilde etkilediği görülmüştür. Deneysel analiz sonuçlarına göre tüm topolojik yapıların baskın gerilme etkisine tepki verdiğini ortaya konmuştur. Özellikle basit kübik yapısının, literatürde bilinen en yüksek özgül enerji değeri olan 27,2 J/g değeri elde edilmiştir. Elde edile bulgular, plaka kafes geometrilerinin özellikle AlSi10Mg malzemeli ile elde edilmesi durumunda enerji soğurma odaklı mühendislik kullanımlarında büyük avantajları olacağını ortaya koymuşlardır. Yüzey tabanlı kafes yapılarının enerji soğurma kapasitesi ve mekanik verimden yararlanılarak tasarlanan Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve karbon fiber takviyeli ABS-CF Gyroid kafes yapılarının Z-yönü basma altında enerji soğurma performansı araştırılmıştır. ABS C10 için özgül enerji sönümleme değerleri, duvar kalınlığının 1,0 mm'den 1,2 mm'ye arttırılmasıyla 0,49 MJ/m^3'ten 0,73 MJ/m^3'e yükseldiği ve %45,3'lük bir artış görülmüş. ABS-CF örneklerinde ise aynı aralıkta özgül enerji sönümleme değeri %23,5 artarken 1,5-2,00 mm aralığında ise %18,1 artış gösterdiği rapor edilmiştir. Ayrıca ABS-CF yapılar, ABS yapılarına göre daha yüksek özgül enerji sönümleme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu farkın, kısa karbon fiberlerin çatlak törpülemene etkisinden kaynaklandığı rapor edilmiştir. Z- yönü altında ABS- CF numunelerin akma gerilmesi, X-yönündeki değerlere göre yaklaşık %50 daha yüksek olduğu rapor edilmiş ve üç boyutlu baskının tipik anizotropik davranışını yansıttığı görülmüştür (B. Xie ve diğerleri, 2025) .

2.3. Kiriş Tabanlı Kafes Yapılarının Mekanik ve Dinamik Davranışları

Gövde merkezli kübik (GMK), yüzey merkezli kübik (YMK), düzgün on ikiyüzlü yapı (Dodecadron) ve bu yapıların türevleri, kiriş tabanlı yapılar arasında en çok araştırılan tasarımlardır. Bu tasarımların ve farklı varyasyonların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Altamimi ve diğerleri (2022), beş temel kiriş temelli kafes yapının farklı kombinasyonlarıyla toplamda 30 adet kafes yapısı incelemişlerdir. Bu 30 kübik yapının sertlik değerleri, yapısal dayanım, anizotropi ve burkulma üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca

yapılar, literatürde teorik doğrulama modelleri olan Maxwell kriteri ve Gibson-Ashby modeline göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca, gövde merkezli kübik yapı ile re-entrant benzeri v-oktet yapı birlikte kullanılarak hibrit yapı oluşturulmuştur. Bu hibrit yapı ile GMK yapısının eğilme davranışı ile v-oktet yapısının sertliğiyle birleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda hibrit yapı, daha düşük anizotropi, daha yüksek sertlik ve çok yönlü mukavemet özelliği göstermiştir. Ancak hibrit yapının bazı yönlerde hala zayıflık gösterdiği tespit edilmiştir.

Kiriş temelli kafes yapıları üzerine yapılan bir diğer çalışma ise tekil gövde merkezli kübik yapısının ötesinde, gradyan ve Z-yönü takviyesi gibi topolojik düzeltmelerdir. GMK yapısını ve bu yapının türevi olan üç farklı yapı incelenmiştir. Bu yapılar sırayla; düzenli YMK, gradyan GMK, düzenli Z yönünden takviyeli GMK ve gradyan Z yönünden takviyeli GMK yapıdır. Bu yapıların basma davranışı, enerji emilim gibi mekanik özelliklerinin yanında Z yönündeki takviye elemanının etkisi ve yapı yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Modeller hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar modellerinin sonuçları, birbiriyle uyumlu çıkmıştır. GMK yapısına Z yönünde takviye eklenmesinin rijitliği 27 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Gradyan GMK yapıların deformasyonunun üst katlardan başlayarak tabaka-tabaka aşağıya doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Ayrıca büyük deformasyonlarda gradyan yapıların daha fazla enerji emdiği belirlenmiştir. Z yönünden takviyeli gradyan GMK yapısının ise enerji sönümleme konusunda en iyi performansı sergilediği görülmüştür (S. Wang, Wang, Xu, Zhang ve Zhu, 2020). Bu bulgular, aynı topolojide dahi farklı mekanik yanıtlar üretebileceğini göstermiştir.

Kiriş tabanlı kafes yapılarının mekanik davranışı yalnızca hücrenin topolojiyle bağlantılı değildir. Mekanik özelliklerin birim hücrenin yığılma yönüyle de değişebileceği görülmüştür. Bu mekanik değişimi araştırmak için Geng, Ma, Liu, Zhao ve Yue (2018) eşkenar düzlemli on ikiyüzlü (Rombik Dodekahedron) ve GMK yapısını incelemişlerdir. Ayrıca GMK yapısı ile aynı birim hücre yapısına sahip olurken farklı yığılma yönü olan bir model daha tasarlanmıştır. Bu üç model toz yataklı ergitme (powder bed fusioni, SLM) yöntemi ile üretilerek mekanik davranışları, farklı yığılma yönlerinin etkileri ve kırılma yüzeylerinin mikro yapısal analizleri incelenmiştir. Modellerin ayrıca sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçlara göre eşkenar düzlemli on ikiyüzlü yapısının yüksek sertlik ve homojen deformasyon özellikleri gösterdiği

belirlenmiştir. Yığılma yönü değiştirilmiş GMK yapısının ise daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Kiriş tabanlı kafes yapıların mekanik özelliklerini değiştiren parametrelerin belirlenmesi için daha geniş bir perspektiften bakılarak üç farklı açık hücreli (open-cell) kafes yapısını incelemişlerdir. Gövde merkezli kübik, gövde merkezli kübik yapının z yönünde ektra dikey kirişler eklenerek modifiye edilmiş yapı ve yüzey merkezli kübik yapıya (Face-centered cubic, FCC) benzer şekilde, her yüzeyden çapraz kirişler ile Z yönünde dikey elemanlar içeren yapı olarak üç model oluşturulmuştur. Bu üç model üzerinde yapısal elastik modül, plato gerilmesi, kompaksiyon deformasyonu, malzeme plastisitesi, geometrik burkulmanın etkileri, kiriş boyut oranları (aspect ratio), birim hücre geometrisi ve boyutlarının yapı davranışına etkisi gibi hasar mekanizmaları incelenmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre GMK yapısının düşük elastisite modülüne sahip olduğu ancak yüksek deformasyon kapasitesi gösterdiği belirlenmiştir. Diğer iki yapının ise daha yüksek sertlik ve plato gerilmesine sahip olurken dikey yönde meydana gelen burkulma nedeniyle daha erken hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kiriş yarıçapı ve hücre boyutunun elastik modül ve plato gerilmeleri üzerinde önemli etkilerinin olduğu görülmüştür (Labeas ve Sunaric, 2010). Benzer şekilde kiriş tabanlı kafes yapıların performansını optimize etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ghaemi Khiavi, Mohammad Sadeghi ve Divandari (2022), PA12 termoplastikten yapılmış farklı topolojiye sahip kiriş tabanlı kafes yapıların mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Öksetik olmayan gövde merkezli kübik, yüzey merkezli kübik, z yönünden güçlendirilmiş yüzey merkezli kübik yüzey-gövde merkezli kübik, z yönünde güçlendirilmiş yüzey-gövde merkezli kübik, x-y-z yönünde güçlendirilmiş yüzey-gövde merkezli kübik ve oktet- kiriş gibi topolojiler karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizinde oktet-kiriş yapısının en yüksek dayanım ve sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Oktet-kiriş yapısının akma dayanımı 4,07 MPa, nihai dayanımı 4,53MPa, elastik modülü 0,099 GPa ve plato gerilmesinin 9,98 MPa görülürken, gövde merkezli kübik yapının nihai dayanımın 0,43 MPa, spesifik elastik modülünün 0.025 GPa ve plato gerilmesinin 0,55 MPa olduğu raporlanmıştır. Hacimsel enerji soğurma açısından maksimum dayanımın gerçekleştiği dayanım değerinde, z yönünde güçlendirilmiş yüzey-gövde merkezli kübik yapı 0,284 MJ/m^3 değeri ile en yüksek, z yönünden takviyeli yüzey merkezli kübik yapının 0,152 MJ/ m^3 değeri ile en düşük değeri aldığı görülmüştür. Sonlu eleman analizleri, gerilme yığılmalarının özellikle düğüm bölgelerinde yoğunlaştığını ve z-ekseni boyunca ek kiriş içeren topolojilerin deformasyon başlangıcında daha yüksek yerel

gerilmelere maruz kaldığını ortaya koymuştur. PA12 esaslı kiriş-tabanlı kafes yapıların performansının topolojiye son derece duyarlı olduğunu ve özellikle oktet-kiriş, x-y-z yönünde güçlendirilmiş yüzey-gövde merkezli kübik ve z yönünde güçlendirilmiş yüzey-gövde merkezli kübik gibi yapıların yüksek dayanım ve enerji soğurma gerektiren uygulamalarda öne çıktığını göstermektedir.

Kiriş temelli kafes yapılarının mekanik özelliklerinin yanı sıra dinamik özellikleri de araştırmacıların ilgisini çekmiştir. ABS'den üretilmiş GMK kafes yapısının hacim oranının ve kalınlığının yapıdaki titreşime etkisi araştırmışlardır. Üç farklı birim hücre boyutu belirlenmiştir: sırasıyla a=5 mm, a=7 mm ve a=10 mm. Her bir hücre boyutu için kiriş yarıçapları değiştirilerek hacim oranları %25, %45 ve %70 olacak şekilde tasarımlar oluşturulmuştur. Toplamda 45 numune eritilmiş biriktirme modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen modellerin katman kalınlığı 0,254 mm olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca numunelere eklenen dış kütlenin titreşim karakteristiği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bunun için yapılara 90 g ve 500 g kütleler eklenmiştir. Titreşim testleri sonucunda, GMK kafes yapısında hacim oranının artması ile ilk doğal frekansın azaldığı gözlemlenmiştir. Numunelerin sıkıştırma testi sonuçlarına göre, yapılar en zayıf gözenek bölgesinden kırılmaya başlamıştır. Ancak %70 hacim oranına sahip kafes yapılarında kırılmanın yüksekliğin orta bölgesinden başladığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, kafes yapılarının tam dolu yapılara göre daha az maliyet ve daha az malzeme kullanımı sağlamanın yanı sıra mekanik özelliklerinin de daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Monkova, Vasina, Zaludek, Monka ve Tkac, 2021). Bu gözlemler, gövde merkezli kübik yapı ailesinin parametre duyarlılığını ve titreşim/sertlik dengesini vurgulamaktadır. Syam ve diğerleri (2018), kiriş temelli kafes yapılarının titreşim izolasyonu özelliklerini artırmak amacıyla tasarımlar yapmıştır. Yapılan modeller sonlu elemanlar ve deneysel çalışmalar yapılarak değerlendirilmiştir. Tasarımlarda toplam hacim, birleşim noktası sayısı, kiriş yarıçapları ve birleşim noktası yarıçapları eşit olacak şekilde altı farklı tasarım oluşturulmuştur. Modeller, kiriş yarıçapları 1,5 mm ve birleşim noktası yarıçapları 2 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Kafes yapıların atalet hesaplamalarında paralel eksen teoreminden yararlanılmıştır. Altı modelin doğal frekansları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış, ayrıca çekiç ve sıkıştırma testleri yapılmıştır. Üretim için üç model seçilmiştir: Model 1, en az sayıda kiriş yapısına sahipken, Model 2 ve Model 3 diğer kafes yapılarına göre farklı davranış sergilemiştir. Model 3, Model 2'ye göre daha büyük atalet momentine sahip olmakla birlikte daha düşük rijitlik göstermiştir. Bu durumun, Model 2'nin

düşük eğilme stresi sergilemesiyle ilişkili olabileceği raporlanmıştır. Deneysel sonuçlar ışığında üretilen modellerin doğal frekansları sırasıyla 50 Hz, 500 Hz ve 320 Hz olarak hesaplanmıştır. 400 Hz'den yüksek frekanslarda modellerin sönümleme oranları hesaplanmış ve Model 3'ün, Model 2 ve Model 5'e göre titreşimi %26 oranında azalttığı görülmüştür. Nihai değerlendirmede Model 3'ün tasarlanan altı model arasında en iyi izolasyon performansına sahip olduğu belirlenmiştir.

Kiriş temelli kafes yapıları ve açık hücreli kafes yapılara ilişkin araştırmalar, yapı rijitliği ve deformasyon davranışını kontrol edebilmek için kiriş yarıçapı, hücre boyutu ve yoğunluk oranı gibi geometrik parametrelerin kafes yapılarında kritik rol oynadığını vurgulamıştır (Syam ve diğerleri, 2018;Labeas ve Sunaric, 2010). Bununla birlikte, hibrit kafes yapılarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar genellikle aynı topoloji ailesi içerisindeki varyasyonlarla sınırlı kalmış, farklı topolojilerin (örneğin GMK ve öksetik gibi) doğrudan bir araya getirildiği özgün tasarımlar nadiren ele alınmıştır (R. Xiao ve diğerleri, 2021 ; N. Li ve diğerleri, 2024).

2.4. Öksetik Kafes Yapıları ve Uygulamaları

Geometrik tasarımdan kaynaklı olarak negatif Poisson oranı oluşturan yapılar literatürde öksetik (auxetic) yapılar olarak bilinmektedir. Bu yapıların yüksek enerji sönümleme potansiyelinin olması araştırmacıların ilgilerini çekmiştir. Aynı zamanda negatif Poisson oranı elde edilmesinin avantajları bu davranışı etkileyen parametreler de araştırmaların ana araştırma konusu olmuştur. Üç boyutlu re-entrant on iki yüzlü kafes yapısının mekanik özelliklerini kiriş teorisine bağlı olarak dört farklı tasarım parametresine göre parametrik olarak hesaplamışlardır. Çalışmada re-entrant yapı için incelenen dört temel tasarım parametresi; düşey kiriş uzunluğu (H), eğik kiriş uzunluğu (L), eğim açısı (θ) ve kiriş kalınlığı (t) olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, kiriş teorisi kullanılarak mekanik özelliklerin birer fonksiyonu olarak ifade edilmiş ve nümerik olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda H/L oranının artması ve θ açısının azalması ile Poisson oranının azaldığı görülmüştür. Örneğin, t=1 mm ve L=5 mm değerleri için Poisson oranı -0,6 olarak hesaplanmıştır. Deneysel incelemeler için farklı tasarımlarda dört adet model üretilmiştir. Analitik ve nümerik hesaplamaların deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu çalışma ile oluşturulan fonksiyonların, farklı özelliklerdeki kafes yapıları için Poisson oranı, hata modu, hata mukavemeti ve etkin modun hesaplanmasında kullanılması yapılacak

tasarımların mekanik cevaplarının tahmininde faydalı olduğu görülmüştür (Yang, Harrysson, West ve Cormier, 2012). Benzer tasarım parametrik kullanarak daha farklı öksetik yapıların aynı parametre değişimlerine göre etkileri de araştırılmıştır.

Mevcut iki boyutlu re-entrant yapısının orta noktalarından düşey yönde birleştirilmesi ile elde edilen yeni üç boyutlu re-entrant yapı üzerine çalışmışlardır. Bu yeni yapının geometrisi yatay uzunluk (H), kiriş uzunluğu (L), re-entrant açısı (θ) ve kalınlık (t) parametreleri değiştirilerek oluşturulmuş ve tek eksenli statik yüklemelere tabi tutulmuştur. Deneylerde, kiriş kalınlığı sabit tutularak farklı Poisson oranları ve göreceli yoğunluklara sahip dört adet numune üretilmiştir. Analitik incelemeler için numunelerle aynı koşullarda üretilmiş üç adet çekme testi numunesi kullanılarak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Oluşturulan modeller öncelikle kendi aralarında, daha sonra sonlu elemanlar modeliyle ve nihai olarak klasik kafes yapılarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçların %20'den az hata oranıyla birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Yeni geliştirilen dört kafes yapısından, H/L oranı 1,3 olan modellerin klasik kafes yapılarına göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu, H/L oranı 2,0 olan yapıların ise aksine klasik kafes yapılarına göre daha düşük mekanik özellikler sergilediği tespit edilmiştir (Shen ve diğerleri, 2021).

Farklı kafes yapıları ile karşılaştırılmaların yapılması öksetik özellik sağlayan yapıların önemi arttırmıştır. İki yaygın kullanılan kafes yapısı olan üç boyutlu re-entrant ve kelvin kafes yapılarının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. İlk olarak re-entrant kafes yapısının sayısal analizleri yapılmış ve tek eksenli yükleme testiyle doğrulanmıştır. İkinci aşamada ise kafes yapılarının deformasyon modları, gerilme-gerinim eğrileri, enerji sönümleme kapasiteleri ve Poisson oranları çekme testleri altında sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, gerilme baskın bu iki kafes yapısı benzer mekanik özellikler sergilemiştir. Ancak re-entrant kafes yapısının enerji sönümleme performansının kelvin kafes yapısına göre daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca re-entrant kafes yapısının gerinim arttıkça negatif Poisson oranına sahip olduğu, kelvin kafes yapısının ise sabit pozitif Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir (Hu, Lu ve Tse, 2024). Diğer kiriş yapılarının kıyaslanmasının yanı sıra farklı öksetik yapılar literatürde sıklıkla araştırılmıştır. Bunlardan bir tanesi re-entrant çift ok ucu öksetik bal peteği yapısıdır. Bu sandviç kirişlerin üç nota eğilme altındaki davranışları araştırılmıştır. Yüklemenin doğrudan öksetik hücrenin üzerine yerleştirildiğinde, yapının yük taşıma ve enerji soğurma kapasitesinin arttığı görülmüştür. Örnek olarak kiriş 25 mm yer değiştirme seviyesinde

hücreler arası uygulanan yükleme durumundaki özgül enerji değerinin hücre üstü yükleme duruma göre %26,49 yüksek bulunduğu raporlanmıştır. Çekirdek duvar kalınlığının yapıya etkisi de araştırılmıştır. Duvar kalınlığının artması eğilme sertliğini arttırmıştır. Duvar kalınlığının z, 0 mm durumunda belirgin bir güçlenme gözlemlenmişken duvar kalınlığının 0,8 mm olduğunda hücre duvarında erken lokal burkulmalar ve stabil olmayan deformasyon modları oluşmuştur. Ayrıca re-entrant çift ok ucu öksetik bal peteği yapısının darbe etkisi incelendiğinde 15 m/s'den büyük ve eşit hızlarda başlangıç ataletinden kaynaklı keskin dalgalanmalar oluştursa da nihai deformasyon biçimde hızdan önemli ölçüde etkilenmediği raporlanmıştır (H. Wang ve diğerleri, 2023).

Kiral (Chiral) öksetik kafes yapısının farklı tasarımlarıyla çok yönlü yüklemeler altındaki mekanik davranışlarını göstermeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, negatif Poisson oranına sahip öksetik yapıların avantajlarından yararlanılması hedeflenmiştir. Analizler için LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. Modelin doğrulaması için tek eksenli yükleme yapılarak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Birim hücrenin geometrik parametreleri olarak bağlantı noktalarının yatay ve düşey uzunlukları, genişlik ve kalınlık değerleri seçilmiştir. Çok yönlü yükleme için düğüm noktası ile kiriş orta noktası arasındaki mesafe değiştirilerek 7 farklı model oluşturulmuş ve bu değişime bağlı olarak Poisson oranları hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, "A" değerinin sıfıra yaklaşmasının daha yüksek gerilmelere yol açtığı görülmüştür. Birim hücredeki "A" değerinin artması gerilim cevabını artırmakla birlikte Poisson oranını da yükseltmiştir. Ayrıca sıkıştırma yüzeyleri ile kafes yapısı arasındaki sürtünme katsayıları değiştirilerek yapı üzerindeki tepki kuvvetleri de incelenmiştir. LS-DYNA yazılımında hücre yapısı için MAT24, sıkıştırma yüzeyleri için ise MAT_ELASTIC kullanılmıştır (Nečemer, Glodež, Novak ve Kramberger, 2020). Aynı ailede, üçlü kiral (trichiral) varyantların dalga yayılımı ve bant genişliği özellikleri titreşim izolasyonu için ek fırsatlar sunmaktadır. Üç bağlantı noktasına sahip hücrelerden oluşan, dairesel düğümler ve bunlara bağlı eğik ligamentlerle oluşturulmuş özel bir kafes yapısı olan üçlü kiral bal peteği (trichiral honeycomb) yapısını incelemişlerdir. Yapının hem düzenli hem de gradyan (dereceli olarak değişen geometrili) versiyonları ele alınmıştır. Sadece sayısal analizlerin yapıldığı bu çalışmada rezonans frekansları, mod şekilleri, dalga yayılım analizleri ve harmonik yükleme altındaki frekans tepkileri incelenmiştir. Ayrıca geometrik parametrelerin ve gradyan konfigürasyonlarının bant genişlik frekans içeriği ve genişliği üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Sayısal sonuçlar, gradyan geometrisine sahip trichiral yapıların düşük frekanslarda dahi geniş bant genişliği sağlayarak pasif titreşim kontrolü açısından avantaj

sağladığını ortaya koymuştur (Shiyin, Xiuchang ve Hongxing, 2015). Bu dinamik üstünlük, titreşim tabanlı enerji hasadı uygulamalarına da taşınabilmektedir. Küçük ölçekli sensörler ve otonom araçların enerji ihtiyacını karşılamak üzere titreşim enerji hasadı yönteminin verimliliğini artırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda negatif Poisson oranına sahip kirişlerin titreşim altındaki davranışlarını hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada Al 6061 malzemesinden üretilmiş dört farklı negatif Poisson oranlı yapı hazırlanmıştır. Bu yapılar re-entrant, üçgen (triangle), kare (square) ve yıldız (star) şeklindedir. Modeller üzerinde nümerik olarak statik analiz, modal analiz ve harmonik analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda titreşim altındaki yer değiştirme miktarları ile piezoelektrik elemanlardan elde edilen voltaj değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Negatif Poisson oranına sahip kirişlerin, düz kirişlere göre doğal frekansları düşürerek yer değiştirme miktarını artırdığı ve böylece enerji hasadı potansiyelini yükselttiği sonucuna ulaşılmıştır (Fevzi ve Bolat, 2022).

2.5. Fonksiyonel Gradyan (FG) ve Hibrit Kafes Yapı Tasarımları

Her kafes yapısının kendi içinde meydana getirdiği dezavantajların ortadan kaldırabilmek amacıyla araştırmacılar farklı uygulamalara yönelmiştir. Geometrik tasarım optimizasyonların yanı sıra bir kafes sistemini birim uzay haline getirip her katmanın kendi içinde optimizasyonun yapılmasının yapının mekanik özelliklerine etkisini keşfetmiştelerdir. Bu tür çalışmalar literatürde genellikle fonksiyonel dereceli ya da fonksiyonel gradyan kafes yapıları olarak geçmektedir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kafes yapılarının katmanlı imalat teknolojisi ile üretiminden mekanik testlerine kadar geniş kapsamlı bir çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı öksetik birimler ve gradyan konfigürasyonlar geliştirilerek malzeme püskürtme ve foto polimerizasyon yöntemleriyle üretilmiş, üretilen yapılar basma ve darbe testleriyle değerlendirilmiş ve enerji sönümleme ile mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ve deneyler sonucunda, özellikle gradyan yapıların tekdüze kafes yapılarına göre daha iyi mekanik özelliklere ve enerji sönümleme performansına sahip olduğu birçok araştırmacı tarafından dile getirilmiştir.

Fonksiyonel derecelendirme yaklaşımının kafes yapılardaki etkisine ilişkin bir diğer çalışma, kare ve elmas (diamond) hücrelerden oluşan iki farklı topolojinin kalınlık boyunca

değişen yoğunluklarla tasarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Basma yükü altında bu iki hücre tipi farklı çökme davranışları sergilemiştir: kare hücreli yapılar katman bazlı ardışık burkulma modları gösterirken, elmas hücreli yapılar çubuk birleşimlerinde mafsal davranışı ile karakterize daha yatay bir plato bölgesi ortaya koymuştur. Deformasyon biçimlerindeki bu belirgin farklılıklara karşın, homojen yoğunluklu numunelerin enerji soğurma değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca iki tür derecelendirme stratejisi (çubuk çapının kademeli değiştirilmesi ve hücre yüksekliğinin ayarlanması) uygulanmış ve yoğunluk dağılımının enerji yönetimi kapasitesi üzerinde kritik rol oynadığı görülmüştür. Optimizasyon sonuçları, yalnızca enerji soğurmanın maksimize edildiği tasarımının toplam kütle sabit tutulmasına rağmen referans elmas–çap derecelendirilmiş yapıya göre enerji soğurma performansını %17,7 artırdığını, ancak bu kazancın başlangıç rijitliğinde %40'a varan bir düşüşe yol açtığını göstermiştir. Buna karşılık minimum rijitlik şartı eklenerek elde edilen çözümünde enerji soğurma %11,3 oranında artarken başlangıç rijitliğinde %30 seviyesinde iyileşme sağlanmıştır. Bu bulgular, yoğunluk derecelendirmesinin dikkatli şekilde uygulanması hâlinde enerji soğurma etkinliğinin anlamlı biçimde iyileştirilebileceğini ve geliştirilen analitik modellerin tasarım aşamasında önemli bir karar destek aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Daynes ve Feih, 2025).

Farklı kiriş kafes topolojilerinden (GMK, GMK-Z, YMK, YMK-Z, GYMK, GYMK-Z) yararlanarak enerji soğurma kapasitesini arttırmaya yönelik fonksiyonel derecelendirme temelli optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışmada homojen kafes yapıları doğrusal olmayan statik sıkıştırma analizleri yapılarak, yapıda meydana gelen gerilme dağılımları çıkarılmıştır. Çıkarılan gerilme değerleri kullanılarak maksimum eşdeğer gerilme değeri kullanılarak kiriş çaplarını arttıran iki farklı derecelendirme kuralı oluşturmuşlardır. Oluşturdukları MATLAB tabanlı algoritma sayesinde enerji soğurma parametrelerini hızlı bir şekilde tahmin etmişleridir. Sonuçlarda görülmüştür ki derecelendirilmiş kafes yapılarında yük yolunun homojen dağıldığını, gerilme yığılmaların azaldığını ve özgül enerji değerlerinin arttığını raporlamışlardır. Özellikle z kolonu içeren topolojilerin hem plato gerilimi hem de enerji sönümleme performansının önemli ölçüde arttığı görülmüştür (Coluccia, Meyer, Liseni, Mittelstedt ve De Pasquale, 2025).

Farklı yoğunluk ve konfigürasyonlara sahip birim hücre yapılarının tek yönlü değişimleri araştırılmıştır. Bu tek yönlü değişimler için üç farklı metodoloji kullanılmıştır. Bunlar; tek

yönlü değişimi olmayan düzgün yapı, aynı yoğunlukta fakat yarıçapı değişen birim hücreler ve yeniden boyutlandırılmış yapı şeklindedir. Bu metodolojilere göre üç yeni tasarım yapılmış ve tasarımların boyutları aynı tutulmuştur. Üç kafes yapısı da 7 katmandan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Yarıçap değişimiyle oluşturulan modelde (RGBCC), yarıçaplar göreceli yoğunluğa göre ayarlanmıştır. Yeniden boyutlandırılmış birim hücre yapısında (SGBCC) ise kiriş yarıçapları düzgün GMK yapısı ile aynı olacak şekilde 1 mm alınmış ve katmanlar içindeki yoğunluk her iki yapı için aynı tutulmuştur. Deneysel ve analitik sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Değerlendirmelere göre, küçük gerinimlerde SGBCC yapısının yüksek genlik ve yüksek modüle sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle SGBCC yapısı diğer iki yapıya göre daha avantajlıdır. Ayrıca SGBCC yapısının klasik GMK yapısına göre daha iyi enerji sönümleme özelliği gösterdiği ortaya çıkmıştır. Sonuçlar Gibson-Ashby metoduyla hesaplanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür Gradyan tasarımın küçük gerinim-modül ve enerji emilimine etkisi hem analitik hem deneysel olarak tutarlı bulunmuştur. Öksetik tabanlı gradyan kurgular, frekans spektrumunun şekillendirilmesi açısından ek kontrol dereceleri sağlamaktadır (Bai ve diğerleri, 2020).

Ti-6Al-4V alaşımdan oluşan gövde merkezli kübik yapıların orta katmandaki kiriş açılarının kademeli olarak 60°, 90° ve 120° olarak değiştirilmesi ile oluşturulan fonksiyonel gradyan kafes sistemleri incelenmiştir. Oluşturulan yapılar hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirilmiştir. Çubuk açında uygulanan değişimin basma dayanımı altında etkisi incelenmiştir. 60 derece açıya sahip düzenli gövde merkezli kübik yapının basma dayanımı 392 MPa elde edilirken, orta katman açısının 60 derece gradyan gövde merkezli kafes yapısının basma dayanımının 403 MPa' a çıktığı rapor edilmiştir. Basma dayanımın arttırmanın yanı sıra %31,4 kütlesel azalma sağlanmıştır. Basma gerilmesindeki bu gelişme diğer kiriş açılarında da görülmüştür. 90 derece varyantları 287 MPa' dan 346 MPa' a, 120 derece varyantları ise 312 MPa' dan 348MPa'a çıktığı raporlanmıştır. Gradyan yapıların densifikasyona daha hızlı ulaşıldığı görülmüştür. Bu nedenler enerji soğurma verimliliği düzenli yapılara göre %6,6 daha küçüktür. Deneysel ve analiz sonuçlarına göre teke bir parametrenin kademli değiştirilmesinin mekanik performansı iyileştirdiğini ancak enerji soğurma açısından sınırlamalar oluşturduğu görülmüştür (J. Wang ve diğerleri, 2025).

Altıgen re-entrant bal peteği (Hexagonal re-entrant honeycomb) yapılarını temel alarak iki farklı gradyan hücre tasarımı geliştirmişlerdir. Birinci tasarımda; re-entrant hücrelerin yatay çubuk uzunluğu (h) her satırda artan şekilde değiştirilmiş ancak açı sabit tutulmuştur. Bu

durumda hücrelerin yatay/dikey oranı yukarıya doğru artmaktadır. İkinci tasarımda ise iç hücre açısı -25°'den 30°'ye sürekli olarak değiştirilmiş, yani yapının alt kısmı re-entrant, üst kısmı ise konvansiyonel hale getirilmiştir. Modeller tam ölçekli sonlu elemanlar analizi (FEA) ve komponent mod sentezi (Component Mode Synthesis, CMS) yöntemi ile incelenmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda öksetik gradyan yapıların modal yoğunluk açısından kontrol edilebilir olduğu görülmüştür. İkinci tasarımın frekans spektrumunu genişletme ve zenginleştirme açısından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Bu yapıların havacılık ve otomotiv gibi alanlarda ses sönümleme ve titreşim kontrolü için potansiyel taşıdığı sonucuna varılmıştır (Boldrin ve diğerleri, 2016). Bu kontrol, uygulama ölçekli örneklerde (ör. ayakkabı tabanı) düşük frekanslı sönümleme gereksinimleri için doğrudan fayda üretmektedir.

Fonksiyonel gradyan (FG) ve negatif Poisson oranına sahip (auxetic) üç boyutlu kafes çekirdekli sandviç plakaların burkulma sonrası (post-buckling) davranışlarını araştırmıştır. Bu amaçla, iki farklı FG çekirdek konfigürasyonu (FG-X ve FG-O) ile tekdüze dağılıma (uniform distributed, UD) sahip bir çekirdek tasarımı karşılaştırılmıştır. Tüm modeller, ABAQUS yazılımında tam ölçekli üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmada iki temel yükleme durumu ele alınmıştır: eksenel yükleme ve termal yükleme. Kafes yapıların geometrik parametreleri olarak eğik kiriş açısı, kiriş uzunlukları ve kiriş yarıçapı kullanılmıştır. Fiziksel deneylerin yapılmadığı bu çalışmada, öksetik üç boyutlu kafes çekirdeğe sahip yapıların, geleneksel (pozitif Poisson oranlı) yapılara göre çok daha yüksek burkulma yüklerini taşıyabildiği görülmüştür. FG-X konfigürasyonunun hem burkulma yükü hem de enerji dağılımı açısından en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlar ayrıca FG konfigürasyonlarının yük taşıma kapasitesini artırdığını ve deformasyon sırasında etkin Poisson oranının değiştiğini ortaya koymuştur (C. Li, Shen ve Wang, 2020).

Sandviç plakaların eğilme davranışlarını iyileştirmek amacıyla fonksiyonel derecelendirişmiş öksetik üç boyutlu kafes çekirdekleri geliştirilmiştir. Öksetik çekirdek, kalınlık yönünde üç farklı fonksiyonel derecelendirilmiş dağılımı yapılmış ve düzenli dağılım ile karşılaştırılmıştır. Mekanik özelliklerin değişimini farklı parametreler ile incelenmiştir. Yapıdaki öksetik yapıların belirgin şekilde daha küçük eğilme deformasyonları gösterdiğini, yük aktarımının öksetik olmayan yapılara göre daha verimli yönlendirdiği görülmüştür. Sıcaklığın yapıya etkisi incelendiğinde sıcaklığın başlangıç deformasyon ve malzeme sertliğini değiştirdiği rapor edilmiştir. Özellikle fonksiyonel

derecelendirilmiş ortam düzlem etrafında tam simetrik yapının diğer fonksiyonel derecelendirilmiş yapılara göre düşük eğilme deformasyonu sağlayarak en iyi eğilme direncine sahip olduğu raporlanmıştır. Bu veriler dikkate alındığından hem fonksiyonel derecelendirmenin hem de geometrik parametrelerin negatif Poisson oranı ve eğilme sertliği üzerinde güçlü etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir (C. Li, Shen ve Wang, 2021).

Tekil kafes yapısı topolojiler dinamik yanıt ve enerji sönümlemede avantajlar sunsa da yük taşıma ve rijitlik gereksinimleri birlikte ele alındığında, farklı hücre ailelerinin bir araya getirildiği hibrit kurgular daha dengeli bir çözüm üretme potansiyeline sahiptir. (R. Xiao ve diğerleri, 2021), gerilme baskın oktet kiriş kafes (Octet-truss, OCT) yapısı ile eğilme baskın GMK kafes yapısını birlikte çalışmışlardır. Genellikle GMK yapılarında, sıkıştırma altında 45° açılı köşegen düzlemleri kayma düzlemi olmaktadır. Bu nedenle güçlü OCT kafes yapısı, GMK matrisinin köşegenlerine yerleştirilerek kayma etkisini azaltmak ve katastrofik sonuçları önlemek amaçlanmıştır. Sonuçlar, OCT hücrelerinin ikinci faz olarak GMK kafes yapısına eklenmesinin yatay ve uzunlamasına sıkıştırma özelliklerini güçlendirdiğini, rijitlik ve enerji sönümleme özelliklerini artırdığını göstermiştir. Bu yaklaşım, faz hibritleştirme ile kesme-kayma etkilerini hedefli azaltma stratejisi sunar. Benzer şekilde, kabuk ve kiriş tabanlı unsurların bir araya getirilmesi, dayanım-sönümleme dengesini ileri taşımaktadır.

Kafes yapılarının hibritleştirme metotlarına ilişkin bir harita çıkarmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla yedi temel kafes yapısından faydalanmışlardır. Seçilen kafes yapılarının geniş bir mekanik ve geometrik özellik yelpazesi sunması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda oktahedral (sekizyüzlü, Octahedral), haç biçimli geometrik (cruciform), elmas (diamond), iki üçgenli (bi-triangular), on ikiyüzlü (dodecahedral), üçlü V (triple-V) ve dört yönlü rombik (four-direction rhombic) yapıları kullanılmıştır. Bu kafes yapılarıyla dört farklı yarı ölçekli hibrit form oluşturulmuştur. Bu hibrit formlar; bütünsel iç içe geçme, voksel değişimli, katmanlı geçiş ve çok ölçekli gömme olarak sıralanmıştır. Söz konusu metodolojiler ve seçilen yedi temel kafes yapısıyla toplam 12 hibrit yapı tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, hibritleştirme mekanizmasının değiştirilmesinin kafes yapılarının özelliklerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Oktahedral ve haç biçimli geometrik kafes yapılarının her ikisinin de voksel değişimli ve katmanlı geçiş yöntemleriyle bir araya getirilmesi sonucunda enerji emiliminde ve nihai mukavemette belirgin artışlar sağlanmıştır. Birincil deformasyon modları sıkıştırma-genleşme ve eğilmeyi birleştiren kafes yapılarının

voksel tekniğiyle araya getirilmesi, birbirlerini etkili bir biçimde tamamladığı gözlemlenmiştir (N. Li ve diğerleri, 2024).

Özgün bir hibrit kafes yapısı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Kabuk tabanlı kafes yapıları, kiriş tabanlı kafes yapılarına göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Ancak kabuk tabanlı kafes yapıları yükleme sırasında oluşan burulma nedeniyle hasara uğramaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla yüzey kafes (surface-lattice, SL) kafes yapısına re-entrant kiriş yapısı eklenmiştir. Re-entrant kafes yapısında en iyi sonucu almak için üç optimum parametre belirlenmiştir. Bu parametreler sırasıyla; kiriş genişliği (H), büküm noktasına olan mesafe (L) ve kalınlık (t)'tır. Bu parametreler kullanılarak kalınlıkları sırasıyla 0,8 mm, 1,2 mm ve 1,5 mm olan dört farklı model tasarlanmıştır. H ve L uzunlukları sabit tutularak oluşturulan re-entrant kafes yapısının içerisine kabuk kafes yapısı yerleştirilmiştir. Yapılan statik ve dinamik testlerde, 1,5 mm kalınlığa sahip modelin dinamik yükler altında daha iyi mekanik özellikler sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, 1,5 mm kalınlığındaki yapının diğer modellere kıyasla titreşim sönümleme ve darbe emiliminin kritik olduğu alanlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Raj, Jiyalal Prajapati, Tsai, Kumar ve Jeng, 2024).

Yapılan tez çalışmasına en yakın geometrik tasarıma ait çalışma öksetik ve z yönünden takviyeli gövde merkezli kafes yapısı esas alınarak üç hibrit tasarım modeli geliştirilmesidir. Öksetik-gövde merkezli kübik, yüzey merkezli – gövde merkezli kübik ve basit küp-gövde merkezli kübik yapıların hibrit tasarım modellerini oluştururken amaç basma dayanımı ve enerji soğurma performansı üzerine etkileri araştırmaktır. Tüm kafes yapılarında PA12 malzemesi kullanılarak 10mm ve 20mm boyutlarında üretilmişlerdir. 20 mm boyutlarındaki yapılar karşılaştırıldığında yüzey-gövde merkezli kübik yapının en yüksek mekanik performans verirken, öksetik yapıya göre %230, z yönünden takviyeli yapıya göre %190 daha yüksek basma dayanımı elde edilmiştir. 10mm boyutlarında ise öksetik yapıya göre %268, z yönünde takviyeli gövde merkezli yapıya göre %188 daha fazla basma dayanımı elde edilmiştir. Diğer hibrit yapıların öksetik-gövde merkezli yapı öksetik yapıya göre %78, z yönlü takviyeli gövde merkezli yapıya göre %57 daha yüksek dayanım elde ettiği raporlanmıştır. Hibrit tasarımların temel yapılara göre daha fazla üstün mekanik performans sunduğu yapılan deneysel sonuçlar doğrulanmıştır. Özellikle yüzey-gövde merkezli kübik yağının hem dayanım hem de enerji sönümleme açısından en yüksek değerleri almıştır. Ayrıca parça boyutunun küçülmesinin baskı kaynaklı kusurların artmasına ve bu kusurların mekanik davranışı daha fazla etkilediği raporlanmıştır (Thant, Ma ve Jahan, 2025).

Negatif Poisson oranına sahip re-entrant kafes yapısını matris olarak kullanarak hacim merkezli dörtgen (Body-Centered Tetragonal, BCTZ) kafes yapısı ile tasarlanmış kompozit bir yapı üzerinde çalışmışlardır. Tasarımdaki temel amaç, BCTZ yapısını takviye elemanı olarak kullanarak daha rijit ve daha güçlü bir yapı elde etmektir. Çalışmada öncelikle 3 boyutlu re-entrant yapının Poisson oranı negatif ve sabit tutulmuştur. Takviye elemanı olarak kullanılan BCTZ kafes yapısı simetrik olacak şekilde farklı dizilimlere sahip üç yeni kompozit model tasarlanmıştır. Toplamda 7 katmandan oluşan kafes yapısında orta katman simetri ekseni olarak kullanılmıştır. PRM olarak isimlendirilen yapı parçalı takviyeli, DFRM yapısı süreksiz takviyeli ve CFRM ise sürekli takviyeli elemanlara sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Modellerin mekanik özellikleri hem sonlu elemanlar yöntemiyle hem de deneysel verilerle hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, CFRM yapısının mukavemeti 3 boyutlu re-entrant yapıya göre %40, elastisite modülü ise %21,3 oranında artmıştır. CFRM yapısının ağır yük taşıyan ortopedik implantlarda kullanımı uygunken, parçalı takviyeli kafes yapısının yüksek enerji emici uygulamalarda daha avantajlı olduğu belirlenmiştir (Sahariah, Namdeo ve Khanikar, 2022).

L. Li ve diğerleri (2023), geleneksel öksetik yapıların dezavantajını gidermek için yıldız bal peteği ve eşkenar dörtgen peteği yapılarının birleştirilerek bir tasarım çözümü sunmuşlardır. Seçici lazer ergitme (Selective laser melting, SLM) yöntemi ile üretilen yıldız-eşkenar dörtgen petek yapıları yarı-statik basma testleri uygulanmasının yanı sıra statik ve dinamik sonlu elemanlar analizleri ile mekanik özellikleri rapor edilmiştir. Elde ettikleri deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarına göre, yıldız-eşkenar dörtgen bel peteği geleneksel yıldız bal peteğine kıyasla daha sert davranmış fakat bu etki negatif Poisson etkisini kaybettirmiştir. Yükleme yönüne göre negatif Poisson oranı ve sertlik değerinin arttığını, öksetik yapının açısının belirlenmesinin önemli olduğunu raporlamışlardır. Gerinim değerinin 0.5 olduğu aralıkta yıldız-eşkenar dörtgen bal peteği yapısının özgül enerji sönümleme değerinin eşkenar dörtgen pal petek yapısına göre %136, yıldız baş peteği yapısına göre %75 daha yüksek olduğunu raporlamışlardır.

Kafes yapıların basma davranışının yanı sıra çekme davranışlarını incelemek amacıyla araştırmacılar, geleneksel 2B boyutlu bal peteği modellerinden farklı bağlanma özelliklerine sahip üç boyutlu öksetik bal peteği kafes yapısı geliştirmişlerdir. Farklı biri hücre konfigürasyonlarına sahip dört farklı üç boyutlu öksetik kafes yapılarını TPU malzemesi kullanarak SLS yöntemi ile üretmişlerdir. Üç boyutlu öksetik bal peteği kafes yapıları hem

çekme hem de basma yükleri altındaki mekanik davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, hibrit yapıların çekme yükü altındaki enerji soğurma değerinin, basma yüküdeki değerden yaklaşık %86 daha fazla olduğunu raporlamışlardır. Hibrit yapıların çekme sertlikleri yaklaşık 13.3 MPa seviyesinde olup geleneksel A-A yapısının sertlik değerinin 1.6 katıdır. Enerji soğurma açısından H-H yapısının, çekme altında 166.89 $mJ/m^{3,}$ basma altında 55.72 mJ/m^3 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Aynı zamanda her yapının çekme gerilme eğrilerinin üç tipik bölgeden oluştuğunu ve kafes geometrisinin Poisson oranını doğrudan etkilediğini raporlamışlardır.

Literatürde kafes yapıları sadece geometrik olarak değil farklı malzemelerin birleşimi ile de mekanik davranışları araştırılmıştır. Bunlara en güzel örneklerden biri piramidal hücrelere dayalı silindirik metal bir kafes yapının poliüretan matrisi ile birleştirilerek kompozit bir yapı oluşturulmasıdır. Oluşturulan bu kompozit yapının enerji soğurma ve titreşim davranışı, farklı parametreler altında incelenmiştir. Yapılan basma testleri ve dinamik uyarım testleri sonucuna göre yapının kompozit hale getirilmesinin titreşim bastırma bandını iyileştirdiği görülmüştür. Çubuk yarıçapının artması enerji soğurma kapasitesini iyi yönde etkilerken, titreşim bastırma kabiliyetini zayıflatmıştır. Kafes tabanlı metal-polimer kompozit sistemlerde tasarım parametrelerinin hem enerji soğurma hem de dinamik performans üzerinde kritik yol ortaya koyduğunu raporlamışlardır (Xue ve diğerleri, 2025).

Plaka tabanlı oktet hücrelerinden oluşan kafes yapıların plaka kalınlığının katmanlar boyunca değiştirilmesi (yapısal derecelendirme) ya da hücre yüksekliğinin ölçeklenmesi gibi geometrik değişiklilere ek olarak farklı malzeme özeliklerine sahip filamentlerin belirli katmanlara yerleştirilmesi (çok malzemeli derecelendirme) ile oluşturulan yapıların basınç altındaki davranışı araştırılmıştır. Deneysel testlerde standart oktet kafes yapıların basınç altında katman boyunca sıralı göçmeler meydana gelirken plaka kalınlığı derecelendirilmiş tasarımlarda en zayıf tabakanın yük yönüne en yakın konumlandırılması ile ilk göçme bölgesinin belirlendiğini, hücre yüksekliği ölçeklenen yapılarda ise en kısa hücrelerin ilk göçme başladığı görülmüştür. Çok malzemeli kafes yapılarında düşük sertlikteki Onyx katmanlarının yüksek sertlikteki Tough Nylon katmanlarından önce göçmeye başladığı rapor edilmiştir. Deneysel ve analitik çalışmaların sonucunda yapısal derecelendirmenin malzeme derecelendirmeye kıyasla daha güçlü bir özgül enerji sönümleme potansiyeline sahip olduğu raporlanmıştır (Nam ve diğerleri, 2023).

2.6. Kafes Yapıların Özel Fonksiyonları ve Uygulama Alanları

Kafes yapıların endüstride birçok farklı alanlarda kullanılmış ve kullanmasına yönelik yenilikçi tasarım çalışmaları yapılmıştır. Özellikle, hava araçlarının statik ve dinamik yükler altındaki dayanımını artırmayı ve düz ile eğri yüzeyli sandviç panellerle ince cidarlı boruların mekanik performansını geliştirmeyi yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla yeni hiyerarşik öksetik kafes yapıları tasarlanmıştır. Tasarlanan modellerin mekanik modül, dayanım ve özgül enerji emilimi değerleri sıkıştırma testleri ile elde edilmiştir. Sandviç panel modelleri kullanılarak düz, tek eğrilikli ve çift eğrilikli panellerde öksetik ve öksetik olmayan yapıların karşılaştırmaları yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyon ile pratik bir tasarım rehberi hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda öksetik ve öksetik olmayan hücresel yapılarla oluşturulan entegre sistemlerin çarpma ve sıkıştırma davranışları açısından önemli bir tasarım rehberi elde edilmiştir (Usta, 2021). Yine hava araçların özelinde yeni bir kanat profili üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tasarlanan yapıda burulma yükleri ile kiriş yönündeki eğilme yeteneğini geliştirmek için kanat profilinin içerisine kiriş tabanlı bir hücre yapısı yerleştirilmiş ve bu yapı deneysel/nümerik yöntemlerle incelenmiştir. Kanat profilinin içerisine L/R oranına göre üç farklı model yerleştirilmiş, modeller hem deneysel hem de nümerik olarak analiz edilmiştir. Deneysel testlerde kanat profiline eğilme yönünde yük uygulanmış ve yükleme sırasında kanat profiline yerleştirilen gerinim ölçerlerle gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Yapılan analizlerde nümerik sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür (Spadoni ve Ruzzene, 2007).

Daha önceki bölümlerde anlatılan hibrit tasarım ilkelerine göre mekanik fonksiyonların yanına akustik sönümleme işlevi eklendiğinde, delikli geometri ve yüzey plakalarıyla çok işlevli tasarım çerçevesi oluşturduğu açıktır. Bu bağlamda L. Li ve diğerleri (2024) kafes yapıların dolu ya da delikli kiriş yapısına sahip olmasının akustik sönümleme etkisini araştırmışlardır. Ayrıca delikli kiriş yapısına sahip dört yüzlü (tetrahedral) kiriş yapısının akustik sönümleme özelliğini geliştirerek çok fonksiyonlu yeni bir delikli dört yüzlü kafes yapısı geliştirmişlerdir. Bu çalışma temelde üç adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, en iyi enerji sönümleme özelliğine sahip geleneksel dolu dört yüzlü kafes yapısı belirlenmiştir. Ardından, gerilim dağılımını daha homojen yapmak için kiriş yapıları delikli yapılara dönüştürülmüş ve son olarak, Helmholtz mekanizmasıyla kafes içindeki boşlukların oluşturduğu ses yalıtımı sorununu önlemek için yüzeylere plaka eklenmiştir. Her adımda ses sönümleme özellikleri ayrı ayrı incelenmiş ve üçüncü adımda oluşturulan tasarımın

diğerlerine göre daha iyi ses sönümleme performansı sağladığı görülmüştür. Üçgen, kare ve altıgen şekillerinde belirlenen gözenekler, 0°, 45° ve 90° yönlendirmeleriyle 9 farklı kafes modelinin titreşim ve sönümleme özelliklerini araştırmışlardır oluşturacak şekilde hazırlanmıştır. Modellerin doğal frekansları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen modellerin doğal frekansları çekme testleriyle belirlenmiştir. Sönümleme katsayılarını hesaplamak için Nyquist çemberinden yararlanılmıştır. Deneysel sonuçların sonlu elemanlar sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre, 0° yönlendirmeye sahip altıgen ve kare 0°-90° dizilimli yapıların yüksek eğilme rijitliğine ve en yüksek doğal frekansa sahip olduğu belirlenmiştir. Gözenek yapısından bağımsız olarak 45° yönlendirme ile oluşturulan modeller daha yüksek sönüm oranına sahiptir. En yüksek sönüm oranı 0° yönlendirilmiş üçgen gözenek yapısında, en düşük ise 90° yönlendirilmiş altıgen gözenek yapısında bulunmuştur (Rajpal, K.P. ve Gangadharan, 2018).

Ayakkabı tabanları için özel olarak tasarlanmış dört temel kafes (lattice) yapısı titreşim ve sönümleme karakteristiği açısından incelemişlerdir. Bu yapılar; ızgara yapı (grid), çapraz yapı (cross), X ve yıldız yapı (star) olarak tanımlanmıştır. Yapıların alternatif ve gradyan kombinasyonlarıyla toplamda 24 farklı "alternating lattice" yapısı oluşturulmuştur. Örneğin, C-G-X yapısı; alt kısmı çapraz yapı, ortası ızgara yapı ve üst kısmı X şeklindedir. 24 farklı yapı, hem tek tip (uniform) hem de alternatif gradyan versiyonlarla karşılaştırılmıştır. Değerlendirme özellikle topuk bölgesi odaklı gerçekleştirilmiştir. Modellerin sonlu elemanlar analizi yapılmış, elde edilen sonuçlar lazer titreşim ölçer ve çekiçli modal test ile doğrulanmıştır. Alternatif gradyan kafes yapılarının özellikle düşük frekans aralığında (0-140 Hz) daha yüksek sönümleme performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bu yapıların ayakkabı tasarımına entegrasyonunun darbe azaltma, ayak sağlığı ve konfor açısından önemli avantajlar sağlayacağı sonucuna varılmıştır (C. Wang ve diğerleri, 2021).

Yapılan literatür taraması sonucunda, araştırmacıların farklı geometrik konfigürasyonlara sahip kafes yapıların mekanik, dinamik ve enerji sönümleme davranışlarını kapsamlı biçimde inceledikleri görülmüştür. Bu tasarımların yanı sıra birçok araştırmacı günlük yaşam ve doğadan esinlenerek Biyomimetik yaklaşımlar, doğadan esinlenilen mikro yapılarla enerji absorpsiyonunun iyileştirilebileceğini göstermiştir (B. Li, Liu, Zhang, Yang ve Yang, 2022). Doğadan esinlenen çalışmaların basınca böcekler yer alsa da deniz canlılarından da esinlenerek kafes yapıları ortaya konulmuştur. Deniz süngerinden iskelet yapısından esinlenerek oluşturulan biyomimetik kafes yapısı (BLS) bu çalışmalara güzel bir

örnektir. Ayrıca BLS yapısı geleneksek öksetik yapılar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve nümerik eğriler kıyaslandığında biyomimetik kafes yapısının plato gerilmesi geleneksel öksetik yapıya göre yaklaşık iki katı seyide olduğu rapor edilmiştir. Poisson oranı ölçümlerinde biyomimetik yapının -0,37 değerinde başlayıp belli bir noktadan sonra sabit kalmış, geleneksel öksetik yapılarak göre daha kararlı öksetik davranış sağladığını ve tüm gerinim aralıklarında sürekli olarak yüksek enerji soğurdukları görülmüştür (Ma ve diğerleri, 2025).

Doğada sadece hayvanlardan değil aynı zamanda besinlerden esinlenerek oluşturulan kafes yapıları mevcuttur. Bunların en güzel örneği Pomelo kabuğunun mikro yapısından esinlenerek ortaya çıkmıştır. Pomelo kabuğundan esinlenerek biyonik prensiplere dayalı negatif Poisson oranına sahip y-kafes yapısı tasarımı yapılmıştır. Hibrit yapılar ve geleneksel gövde merkezli kübik yapısı sayısal ve deneysel çalışmalar yapılarak yapıların mekanik özellikleri ve enerji soğurma davranışları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Y kafes yapısı tek başına gövde merkezli kübik yapısına göre daha yüksek elastik modül, akma dayanımı ve plato gerilimi sergilediği raporlanmıştır. Enerji soğurma kapasitesinin de gövde merkezli kübik yapıya göre belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Hibrit yapıların ise bu iki yapı değerlerinin arasında kaldığı görülmüştür. Hibrit yapıdaki gövde merkezli kübik yapı oranını arttıkça hibrit yapı özelliklerinin gövde merkezli kübik yapıya yaklaştığı görülmüştür. Biyonik tasarım prensibine sahip bu y-kafes yapılarının hem anizotropik özellikler hem de enerji sönümleme açısından önemli potansiyel sunduğu raporlanmıştır (Sun ve diğerleri, 2024).

3. KAFES YAPILARI

Kafes yapılar, aynı veya farklı geometrik topolojiye sahip birimlerin x, y ve z uzaysal yönlerde düzenli veya belirli bir bağlam biçiminde bir araya getirilmesiyle oluşturulan, gözenekli birim hücrelerden meydana gelen topolojilerdir. Bu yapılar temelde iç yapılarında boşluklar mevcut olan gözenekli yapı konseptinden türemiştir. Fakat gözenekli yapıların kullanım çok geçmiş çağlara antik dönemlere kadar uzanmaktadır. Yapılan arkeolojik bulgulara göre gözenek yapıların en erken özellikleri gözenekli kemik dokusunun yapısından esinlenilerek üretilmiş seramik filtrelerdir. Daha ileri çağlarda 20.yüzyılın başlarında, özellikle II. Dünya Savaşı sonrasında metal köpüklerin geliştirilmesi, gözenekli yapıların mühendislik uygulamalarında kullanılmasının önünü açmıştır. 1970'li yıllardan itibaren bu yapılar, biyomalzeme alanında kemik implantları ve doku iskeleleri gibi uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojik gelişmelerle birlikte üç boyutlu baskı (eklemeli imalat) yöntemlerinin ortaya çıkması, karmaşık topolojilere sahip kafes yapıların yüksek hassasiyetle üretilmesini mümkün kılmıştır. Bu gelişme sayesinde kafes yapılar, yalnızca biyomedikal değil, havacılık, otomotiv ve savunma gibi yüksek mühendislik performansı gerektiren sektörlerde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

Kafes yapıları diğer mühendislik yapı türlerinden ayıran en önemli özellik, mekanik davranışlarının yalnızca kullanılan malzeme türüne değil; aynı zamanda birim hücrelerin konumlandırılmasına, geometrik tasarımına, dizilim yönüne ve genel topolojik düzenine de bağlı olmasıdır. Bu özellik, araştırmacılara ve tasarımcılara farklı yükleme koşulları altında istenen mekanik özelliklere sahip hafif ve yüksek performanslı yapılar geliştirme olanağı sunmaktadır.

Ashby (2006), gözenekli yapıları dört temel kritere göre incelemiştir: gözenek tipine göre: açık hücreli ve kapalı hücreli; geometrik düzenliliğe göre: düzenli ve düzensiz; malzeme türüne göre: polimerik, metalik ve kompozit; üretim yöntemine göre: döküm ve eklemeli imalat.

Ráž, Chval ve Pereira (2024) 'a göre kafes yapılarını birim hücre özelliklerine ve hücrelerin tekrarlama biçimlerine göre üç ana başlıkta sınıflandırmıştır: topolojiye göre sınıflandırma, geometrik elemanlara göre sınıflandırma ve boyut ölçeğine göre sınıflandırma. Topolojiye göre kafes yapıları açık hücreli ve kapalı hücreli olarak ikiye ayrılırken; geometrik

elemanlara göre sınıflandırmada kafes yapıları, çubuk bazlı (strut-based) ve yüzey bazlı (surface-based) olmak üzere iki ana grupta incelenmiştir. Çubuk bazlı yapılara örnek olarak basit kübik (simple cubic), gövde merkezli kübik (GMK), yüzey merkezli kübik (YMK), sekizgen ve geri bükülen (re-entrant) hücre yapıları verilebilir. Yüzey bazlı yapılara ise gyroid, Schwarz, Weaire–Phelan ve Kelvin hücreleri örnek gösterilebilir. Boyut ölçeğine göre sınıflandırmada ise kafes yapılar homojen (birim hücre boyutu sabit) ve heterojen (birim hücre boyutu değişken) olarak iki grupta değerlendirilmektedir.

Bu temel sınıflandırmalara ek olarak, Pan, Han ve Lu (2020) 'a göre kafes yapılarını düzenli (uniform) ve düzensiz (non-uniform) olarak da iki grupta incelemiştir. Non-uniform kafes yapılar kendi içinde gradyan (değişken) ve negatif Poisson oranlı (NPR) sistemler olarak alt kategorilere ayrılmaktadır. Bir başka yaklaşımda ise kafes yapıları rastgele (random), periyodik (düzenli) ve yarı-periyodik (konformal) olarak üç farklı grupta ele alınmıştır. Rastgele kafes yapılar, hücrelerin düzensiz dağılımı sonucu oluşan stokastik yapılardır. Periyodik kafes yapılar, aynı topolojiye sahip birim hücrelerin düzenli dizilimiyle oluşturulurken; yarı-periyodik yapılar, aynı hücre topolojisinin farklı boyut ve yoğunluklarda kullanılmasıyla meydana gelir.

Düzenli kafes yapıların tasarımı ve optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, bu yapıların geometrik yöntemlerle veya matematiksel algoritmalarla üretilebileceğini göstermiştir. Geometrik temelli kafes yapılar genellikle dört yüzlü (tetrahedral), oktahedral ve Kelvin hücrelerinden türetilirken; algoritmik temelli kafes yapılar doğadan esinlenilmiş bölgeleme (Voronoi bölütleme), boyut gradyan yöntemi (Size Gradient Method, SGM) veya topoloji optimizasyonu ile oluşturulmaktadır. Düzensiz kafes yapılar ise gradyan ve topoloji optimizasyonuna dayalı yapılar olarak iki alt grupta sınıflandırılmaktadır. Gradyan kafes yapılar, birim hücre yoğunluğunun kademeli veya sürekli biçimde değiştirildiği, fonksiyonel derecelendirilmiş (FG) karakterine sahip sistemlerdir. Topoloji optimizasyonu tabanlı kafes yapılar ise homojenleştirme ve boyut karşılaştırma yöntemleri kullanılarak en uygun kütle-rijitlik dağılımı elde edilecek şekilde tasarlanmaktadır.

Farklı yaklaşımlar bir arada değerlendirildiğinde, kafes yapıları genel anlamda beş temel başlık altında sınıflandırmak mümkündür: Geometrik özelliklere göre sınıflandırma, yük taşıma mekanizmasına göre sınıflandırma, topoloji ve hücre tipine göre sınıflandırma, üretim yöntemine göre sınıflandırma, fonksiyonel kullanım alanına göre sınıflandırmadır.

Geometrik sınıflandırma kapsamında kafes yapılar genellikle periyodik, yarı-periyodik ve stokastik (rastgele) olmak üzere üç grupta değerlendirilir. Periyodik kafes yapılar, uzayda düzenli olarak tekrar eden hücrelerden oluşur ve rijitlik–ağırlık oranının optimize edilmesi gereken mühendislik uygulamalarında yaygın biçimde kullanılır. BCC, FCC, Kelvin ve oktet- kiriş (Octet Truss) yapıları bu gruba örnektir. Simetrik olmaları, bu sistemlerin elastik ve plastik deformasyon bölgelerinin hesaplamalı olarak daha doğru analiz edilmesini sağlamaktadır. Yarı-periyodik kafes yapılar, belirli bir düzeni korumakla birlikte hücre boyutlarının veya yoğunluklarının kademeli olarak değiştiği sistemlerdir. Bu özellik, yapının farklı bölgelerine bölgesel mekanik özellik kazandırılmasına olanak tanır. Literatürde fonksiyonel gradyan yapılar (FG) bu gruba örnek olarak gösterilmektedir. Stokastik kafes yapılar ise doğadan esinlenilmiş rastgele hücre dağılımına sahip yapılardır. Enerji sönümleme ve kontrollü çökme davranışı açısından avantajlı olmalarına karşın, karmaşık geometrileri nedeniyle doğrusal olmayan mekanik tepkiler sergileyebilirler ve bu durum sayısal modellemelerini zorlaştırır.

Pan ve diğerleri (2020), kafes yapılarını rastgele (stokastik), periyodik (düzenli) ve yarı-periyodik (konformal) olmak üzere üç grupta sınıflandırmıştır. Rastgele kafes yapılarda birim hücreler stokastik bir dağılımla yerleşirken; periyodik yapılarda aynı topolojiye sahip hücreler uzayda düzenli olarak tekrar eder. Yarı-periyodik yapılarda ise aynı hücre topolojisi, yerel gereksinimlere bağlı olarak farklı boyut ve/veya yoğunluklarla kullanılır. Aynı çalışma kapsamında düzenli (uniform) kafeslerin tasarım ve optimizasyonu iki başlık altında ele alınmıştır: (i) geometrik yöntemlerle üretilen hücre-bazlı yapılar (ör. tetrahedral, oktahedral ve Kelvin hücreleri) ve (ii) matematiksel/algoritmik olarak üretilen yapılar (Voronoi tessellation; Size Gradient Method (SGM); topoloji optimizasyonu tabanlı kafesler). Düzensiz (non-uniform) kafesler ise iki ana sınıfa ayrılmıştır: (i) gradyan kafes yapıları (birim hücre boyutu/yoğunluğu kademeli ya da sürekli değişken; fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle oluşturulabilir) ve (ii) topoloji optimizasyonu ile elde edilen kafesler. Topoloji optimizasyonu yaklaşımında tasarım; homojenleştirme, boyut karşılaştırma/ölçüt temelli yöntemler ve homojenleştirme–optimizasyon–yapı (HOY) iş akışlarıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Yük taşıma mekanizmasına göre yapılan sınıflandırma ilk olarak Deshpande, Ashby ve Fleck (2001) tarafından ortaya konmuştur. Bu yaklaşıma göre kafes yapılar, yük aktarım biçimlerine göre gerilme baskın (stretch-dominated) ve eğilme baskın (bend-dominated)

olarak ikiye ayrılır. Gerilme baskın yapılarda yük, eksenel yönde aktarılır ve yapının deformasyona direnci artar. Buna karşılık eğilme baskın yapılarda yük, hücre kollarında eğilme momentiyle taşınır; bu nedenle bu yapılar daha yüksek enerji sönümleme kapasitesi sergiler. Dolayısıyla, yüksek rijitlik ve düşük deformasyon istenen uygulamalarda gerilme baskın yapılar; yüksek enerji emilimi ve darbe dayanımı gereken uygulamalarda ise eğilme baskın yapılar tercih edilmektedir.

Vafaeefar, Moerman ve Vaughan, (2024) , gyroid, dual-lattice ve spinodoid kafes yapılarını inceleyerek deformasyon modlarını karşılaştırmıştır. Dual-lattice yapıların gerilme baskın davranış gösterdiği ve yüksek gerilme dayanımı sağladığı, gyroid yapıların ise eğilme baskın davranış göstererek uzun enerji emme platosuna sahip olduğu belirtilmiştir. Spinodoid yapıların ise karmaşık bir deformasyon mekanizması sergilediği görülmüştür. Glaesener, Lestringant, Telgen ve Kochmann (2019), periyodik kafes yapıların mekanik davranışlarını incelemiş ve üçgen veya çapraz destekli kafeslerin gerilme baskın, altıgen ve elmas yapıların ise eğilme baskın deformasyon moduna sahip olduğunu göstermiştir.

Topoloji ve hücre tipine göre sınıflandırma, birim hücrelerin geometrisine ve bağlanma düzenine göre yapılır. Bu bağlamda kafes yapılar genel olarak çubuk bazlı (strut-based), yüzey bazlı (surface-based, TPMS) ve katı veya köpük tabanlı olmak üzere üç gruba ayrılır. Çubuk bazlı yapılarda yük, düğüm noktaları arasında konumlandırılmış çubuk elemanlar aracılığıyla taşınır; bu durum modelleme ve üretim açısından yüksek esneklik sağlamaktadır. Yüzey bazlı (TPMS) yapılar minimal yüzey geometrileri sayesinde yüksek özgül dayanım ve biyouyumluluk sunar. Askari ve Jamalzadeh (2024) , çubuk bazlı, yüzey bazlı ve katı tabanlı kafes sistemlerini karşılaştırmış; TPMS yapıların çubuk bazlı yapılara göre yaklaşık iki kat daha yüksek dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi sağladığını belirtmiştir. TPMS yapılar çekme altında yüksek dayanım gösterse de kırılgan davranış sergilerken, çubuk bazlı yapılar daha sünek davranış göstermektedir.

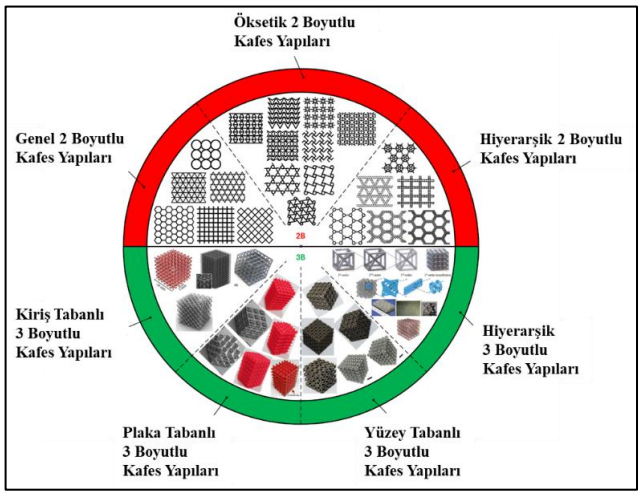
Lin ve diğerleri (2025) , TPMS yapıların mekanik performansını artırmak amacıyla geçiş bölgelerinde sürekliliği koruyan bir optimizasyon yöntemi geliştirmiştir. Katmanlı imalatta geometrik süreksizliklerin dayanımı düşürdüğünü tespit etmiş ve farklı TPMS hücrelerinin kombinasyonlarının bu sorunu azaltarak mekanik performansı iyileştirdiğini göstermiştir.

Üretim yöntemine göre sınıflandırmada, kafes yapıların karmaşık geometrileri nedeniyle geleneksel imalat yöntemlerinin yetersiz kaldığı; ancak katmanlı imalat teknolojilerinin (SLM, EBM, SLA vb.) bu kısıtları ortadan kaldırdığı görülmektedir. (Yuran, Yildirim ve Yavuz, 2024) , farklı üretim tekniklerini karşılaştırarak, bağlayıcı püskürtme yönteminin paslanmaz çelik kafeslerde; doğrudan enerji biriktirme (DED) yönteminin Ti-6Al-4V alaşımlı yapılarda; malzeme ekstrüzyon yönteminin polimer kafeslerde, toz yatağı füzyonunun karmaşık metalik yapılarda ve foto polimerizasyonun ise yüksek hassasiyetli mikro ölçekli kafeslerde en uygun teknikler olduğunu belirtmiştir.

Fonksiyonel sınıflandırma ise kafes yapıların kullanım amacına göre yapılmaktadır. Biyomedikal uygulamalarda, kemikle bütünleşebilen, uygun gözenek yapısına sahip ve yeterli mekanik dayanım sunan kafes yapılar tercih edilir. Bu bağlamda TPMS yapılar, osteogenez ve hücre proliferasyonu açısından oldukça avantajlıdır (Zadpoor, 2019) . Isı değiştiricilerde kullanılan kafes sistemlerinde ise yüksek yüzey alanı/malzeme oranı ve kontrollü akış geçişi sağlanmalıdır. Ayrıca akustik yalıtım, elektromanyetik soğurma veya darbe sönümleme gibi özel uygulamalarda da belirli topolojilere sahip kafes yapılar kullanılmaktadır (Lotfi ve Sunden, 2023).

Kafes yapılar boyut temelinde iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) olarak ele alınabilir. 2B yapılar genellikle düzlemsel çubuklardan oluşur ve tek yönde yük taşırlar; en yaygın örnek bal peteği (honeycomb) olup yüksek rijitlik/ağırlık oranı ve düşük maliyet avantajı vardır. 3B kafes yapılar ise yükleri tüm uzayda taşıyabilecek şekilde tasarlanır; eksenel, eğilme ve burulma etkilerine karşı direnç gösterebilirler.

Bu bağlamda, tez çalışmasında referans olarak sınıflandırma Şekil 3.1'de verilmiştir. Bölüm 3.1'de 2B kafes yapıların (özellikle öksetik düzlemsel hücrelerin) temel ilkeleri; Bölüm 3.2'de ise 3B kafes yapıların (BCC, Kelvin, Gyroid vb.) geometrik/topolojik seçenekleri, üretim yöntemleri ve mekanik davranışları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır.



Şekil 3.1. Kafes sistemi sınıflandırması (Yin ve diğerleri, 2023)

3.1. İki Boyutlu (2B) Kafes Yapılar

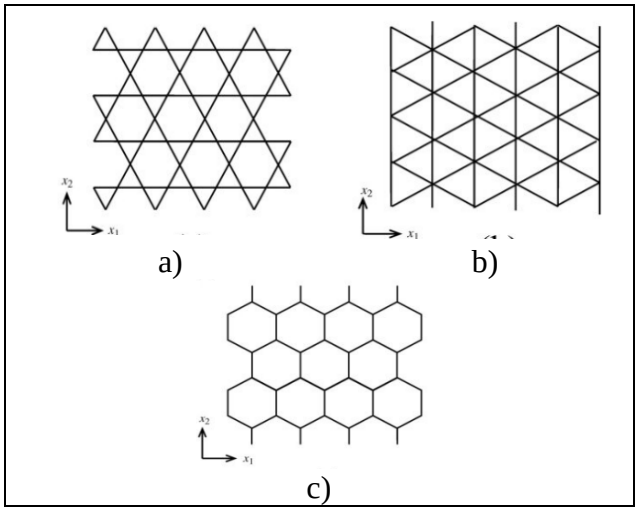
İki boyutlu kafes yapıları, hücrelerin bir düzlem üzerinde (genellikle x-y düzleminde) oluşturulması ve tekrarlanması ile oluşturulan kafes yapılarıdır. Düzlem üzerinde tasarlanmalarından kaynaklı olarak yükleri düzlem içinde taşırlar. İki boyutlu kafes sitemleri belirli geometrik kurallara göre tasarlanmış kiriş, çubuk veya yüzey elemanlardan oluşturulmuş yapılardır. İki boyutlu kafes yapıları kafes sistemlerinin temelini oluşturmasından kaynaklı olarak mühendislik analizlerinde ilk adım olarak literatüre yansımıştır. Özellikle son yıllarda eklemeli imalatın ve üretim yöntemlerinin gelişmesi ile iki boyut ve iki boyutu temel alarak tasarlanan kafes yapılarının üretilebilirliği artmış ve farklı malzemeler (polimer, metal, kompozit) imalatları mümkün hâle gelmiştir (Pan ve diğerleri, 2020). Literatürde en sık kullanılan iki boyutlu kafes yapılarının örnekleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

İki boyutlu kafes sistemlerinin mühendislik alanında yaygın olmasının en büyük katkıları düşük yoğunlukta yüksek sertlik ve dayanım sağlayabilmesidir. Bu artılarının yanı sıra iki boyutlu kafes sistemlerinin hafiflik getirmesi özellikle uçak panelleri, otomotive gövde elemanları, enerji sönümleyici tampon sistemleri ve sandviç yapı çekirdekleri gibi çok geniş bir alanda kullanılma imkânı sağlamıştır. Ayrıca bu yapılar, enerji soğurma kapasiteleri ve kontrollü deformasyon davranışları sayesinde darbe, titreşim ve ses yalıtımı uygulamalarında iyileştirme sağlamıştır (Chibinyani, Cephas Dzogbewu, Maringa ve Muiruri, 2023).

Kafes yapılarının mekanik davranışı iki boyutlu birim hücrenin geometrisine bağlı olarak davranış sergiler. Literatürde en yaygın incelenen topolojiler kare (grid tipi), üçgen (truss tipi) ve altıgen (honeycomb tipi) yapılardır. Üçgen yapıları, yüksek setlik ve kararlılık sunarken; kare yapılar üretim kolaylığı ve kesme dayanımı avantajı sağlamıştır. Altıgen yapılar ise, literatürde sıkça araştırılan ve en verimli en verimli hücre düzenlerinden biridir (Omidi ve St-Pierre, 2022).

Teknolojinin gelişmesi ve mekanik isterlerin artması ile özel iki boyutlu geometriler sıkça çalışılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalar ışığında özel iki boyutlu kafes yapıları arasında negatif Poisson oranına sergileyen öksetik yapılar büyük ilgi görmüştür. “Ters girişli altıgen (Re-entrant honeycomb)” veya “Dönen kareler (rotating squares)” gibi bu özel tasarımlar, yükleme altında genişleme yönünde aynı anda büyüme eğilimi gösterir. Bu özellik, enerji sönümleme kapasitesini ve darbe dayanımını artırır (Yu, Savinov, Matura, Zhang ve Shi, 2025).

Özel geometrilerin yanı sıra iki boyutlu kafes yapıların hücre içi açılarının, bağlantı noktalarının, çubuk şekillerini ve çubuk kalınlıklarının değiştirilmesiyle aynı yapı farklı sertlik veya deformasyon davranışları sergileyebilir. Bu nedenle iki boyutlu kafeslerin geometrik tasarımı, malzeme verimliliğini ve mekanik performansı en üst düzeye çıkarmada temel bir tasarım parametresidir.



Şekil 3.2. İki boyutlu kafes geometrileri (Chen, 2017) : (a) Kagome kafes yapısı, (b) Üçgen balpeteği (c) Altıgen (balpeteği)

İki boyutlu kafes yapılar, düzlem içi yükler altında çekme, basma, kesme ve eğilme gibi temel deformasyonlara sahiptir. Gibson ve Ashby'nin "Cellular Solids" modeline göre (Gibson ve Ashby, 1997), elastik modülü, akma dayanımı ve enerji soğurma kapasitesi; hücre yoğunluğu (ρ^*) ile doğrudan ilişkilidir. Elastik modül ve akma dayanımı sırasıyla $E^*/E_s \sim (\rho^*/\rho_s)^n$ve $\sigma^*/\sigma_s \sim (\rho^*/\rho_s)^m$ ilişkileriyle tanımlanabilir.

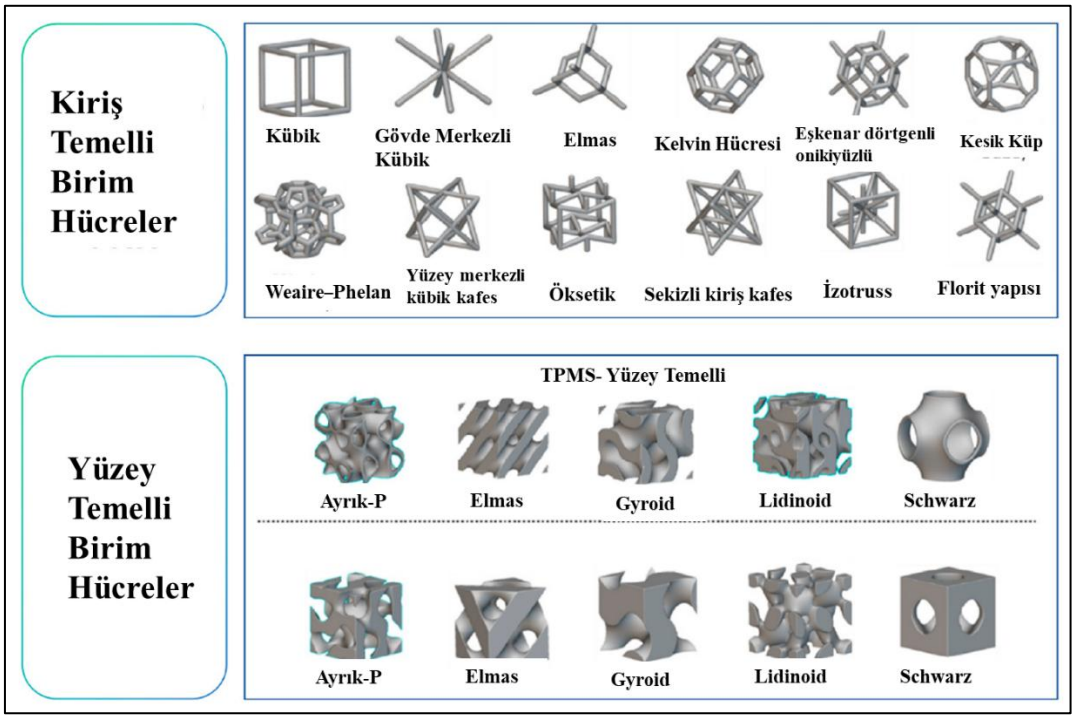
Son dönemlerde yapılan çalışmalarda, eriterek yığma (FDM) yöntemiyle üretilen iki boyutlu PLA kafes yapıların basma testleri gerçekleştirilmiş ve bu testler sonucunda enerji emme (EA) ile özgül enerji emme (SEA) değerleri hesaplanmıştır. Deneysel bulgular değerlendirildiğinde hücre geometrisinin, yapıların enerji soğurma kapasitesi üzerinde etkiye sahip olduğunu ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra üretim sürecinde oluşabilecek kusurlar, örneğin filament süreksizlikleri, bağlantı noktası zayıflıkları veya katmanlar arası yapışma hatalar, yapının beklenen sertlik ve dayanımını önemli ölçüde azaltabileceği görülmüştür. Bu nedenle, iki boyutlu kafes yapıların mekanik davranışlarının güvenilir biçimde değerlendirilebilmesi için hem deneysel hem de sonlu elemanlar temelli analizlerin birlikte kullanılması büyük önem taşır.

İki boyutlu kafes yapılar, bir kafes geometrisinin temel parametrelerinin (hücre yoğunluğu, çubuk kalınlığı, çubuk türü, bağlantı açıları) belirlenmesinde ve mekanik performans üzerindeki etkilerini belirlenmesinde başlangıç noktası oluşturmaktadır. Gibson ve Ashby (1997) çalışmaları ile hücre yoğunluğu ile elastik modül arasındaki $E^* \sim \rho^n$benzeri ilişkiler, malzeme verimliliğinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak tanır. Bu kapsamda, iki boyutlu düzlemde elde edilen geometrik, mekanik ve enerji emme verilerinin analizi hem hibrit hem de gradyan karakterli üç boyutlu kafes yapıların tasarımında temel girdileri sağlamaktadır. Bir sonraki alt bölümde (3.2. Üç Boyutlu Kafes Yapılar), iki boyutlu sistemlerde elde edilen bulgular uzaysal (x–y–z) yönlerde tekrarlanan hücrelerin oluşturduğu üç boyutlu tasarımlara genişletilecek; hücre bağlantılarının uzaysal koordinasyonunun mekanik davranış üzerindeki etkileri detaylandırılacaktır. Böylece iki boyutlu yapıların sunduğu teorik altyapı, çok işlevli ve enerji sönümleyici üç boyutlu kafes sistemlerinin anlaşılması için köprü görevi görecektir.

3.2. Üç Boyutlu (3B) Kafes Yapılar

Üç boyutlu kafes yapıları hem eksenel hem de eğilme kuvvetlerini taşıyabilen yapılarıdır. Bu özelliklerinin yanı sıra yüksek özgül dayanım ve hafiflik gereksinimi bulunan mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek etkili yapı sistemleridir. Geleneksel yapılara kıyasla, 3 boyutlu kafes yapıları, yapı içindeki belirli bölgelerde ihtiyaç duyulan yapısal verimliliği arttırmaya olanak tanır. Özellikle eklemeli imalat teknolojilerin gelişmesiyle birlikte, karmaşık geometriye sahip kafes yapılarının tasarım ve üretimi kolaylaşmış, bu sayede birçok mühendislik alanında kullanım alanı bulmuştur.

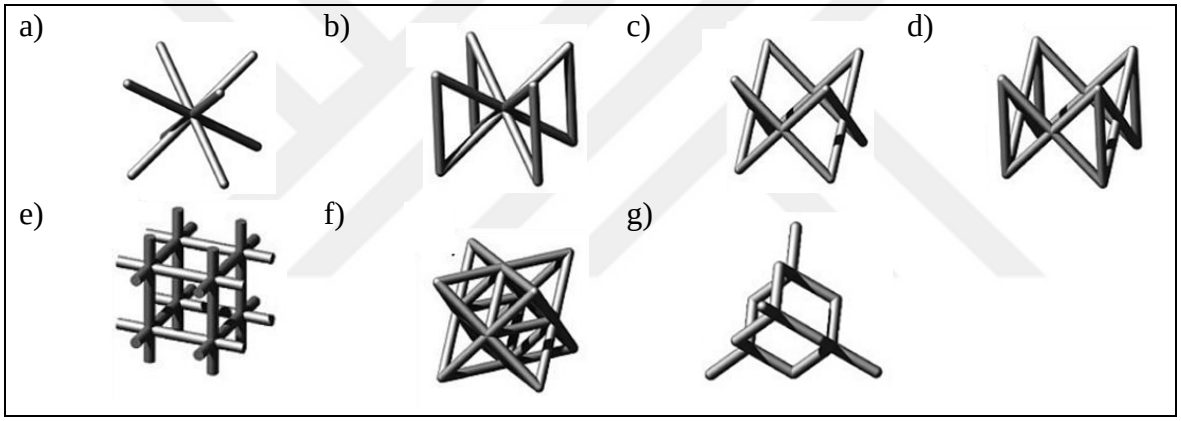
Üç boyutlu kafes yapılar, kendi içinde farklı amaçlara uygun olarak gruplandırılabilir. Yapısal davranış, performans tahmini ve üretim açısı bakımından değerlendirildiğinde, geometrik yapısına göre 3 boyutlu kafes yapılarını gruplandırmak daha açıklayıcı bir yaklaşım olmuştur. Bu bağlamda Üç boyutlu kafes yapılarını dört grupta incelenebilir: Kiriş tabanlı (Strut-bazlı) yapılar, plaka tabanlı (Plate-based), yüzey tabanlı (TPMS) ve hiyerarşik yapılar (Y. Li ve diğerleri, 2024). Üç boyutlu kafes yapılarında en çok kullanılan birim hücre geometrileri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Üç boyutlu kafes yapısı birim hücre örnekleri (Y. Li ve diğerleri, 2024)

3.2.1. Kiriş tabanlı kafes yapıları

Kiriş tabanlı kafes yapıları 3 boyutlu kafes yapıları içerisinde en yaygın kullanılan kafes yapılarıdır. Bu yapılar düğüm (node) denilen bağlantı noktalarından ve yük taşıyan çubuk (struct) elemanlardan oluşur. Gövde merkezli kübik (GMK / Body-Center Cubic- BCC), yüzey merkezli kübik (YMK / Face- Center Cubic- FCC), Kelvin hücresi ve sekizli kafes yapısı (Octet-truss) yapıları bu grubun en yaygın kafes yapılarıdır (Benedetti ve diğerleri, 2021). Bu yapıların en önemli avantajı ise geometrik olarak kolay tasarlanabilir olmaları ve sayısal analizlerinin diğer yapılara göre daha basit gerçekleştirilebilmesidir. Bu sayede parametrik optimizasyonlar süreçlerine de kolaylıkla uyum sağlayabilir. Kiriş temelli kafes yapılarının yedi temel birim hücre örneği Şekil 3.4'te verilmiştir.

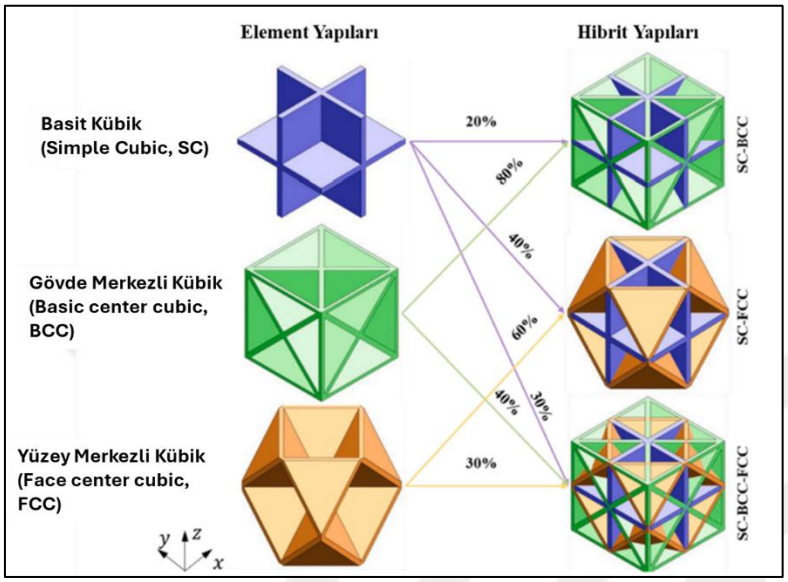


Şekil 3.4. Kiriş tabanlı kafes yapıları (Maconachie ve diğerleri, 2020): a) Gövde merkezli kübik, b) Z takviyeli gövde merkezli kübik, c) Yüzey merkezli kübik, d) Z takviyeli yüzey merkezli kübik, e) Kübik, f) Oktet-kiriş ve g) Kristal

3.2.2. Plaka tabanlı (Plate-based) kafes yapıları

Plaka tabanlı (Plate-Based) yapılar, düzlemsel yük taşıyıcı yüzeylerin geometrik olarak üç boyutlu hâle getirilmesi sonucu oluşturulan kafes yapılarıdır. Bu yapılar, ince plaka biçiminde hücre duvarlarına sahip olup, eğilme ve basma altında diğer kafes türlerinden daha homojen deformasyon gösterirler. Genellikler sandviç sistemlerde kullanılan bu yapılar, kiriş tabanlı kafes yapılarına kıyasla daha izotropik bir davranış sergiler. Yük dayanımı gerektiren enerji emici sistemler ve yük altında kontrollü çökme davranışları göstermesi nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekerler (T. Li, Jarrar, Abu Al-Rub ve Cantwell, 2021). Ancak bu yapıların dezavantajı, ince hücre duvarlarına sahip olmaları nedeniyle üretim

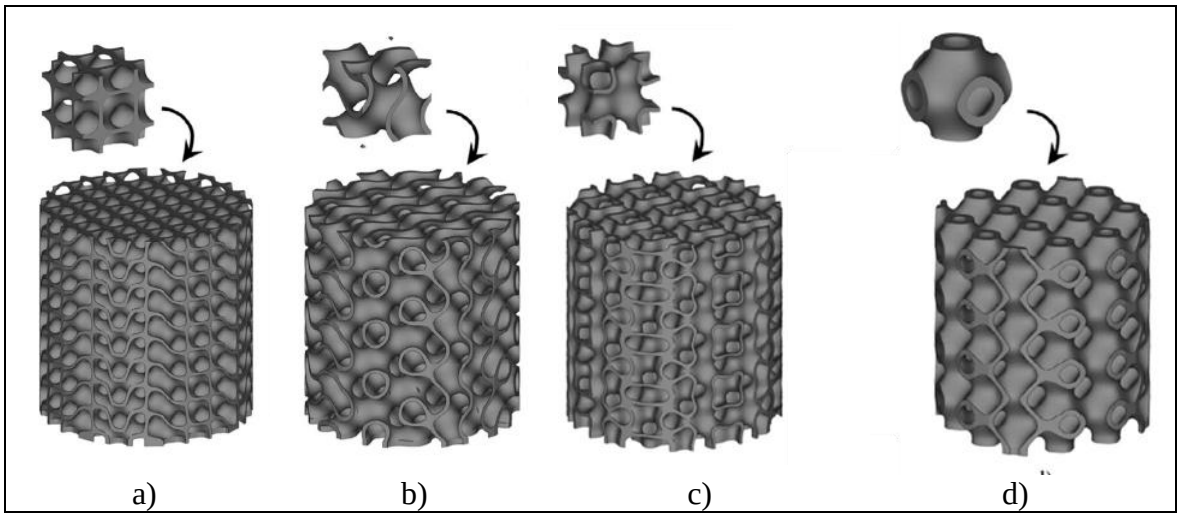
sırasında ince yüzeylerin deformasyona eğimli olmasıdır. Bu sebeple üretim sonrası ısıl işlemlere ve hassas kalite kontrolleri yapılmasına gerek duyulur. Farklı plaka tabanlı kafes yapılardaki ve kombinasyonlarının örneği Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Hibrit plaka kafes yapılarının şematik gösterimi (Andrew ve diğerleri, 2021)

3.2.3. Yüzey tabanlı (Sheet-based) kafes yapıları

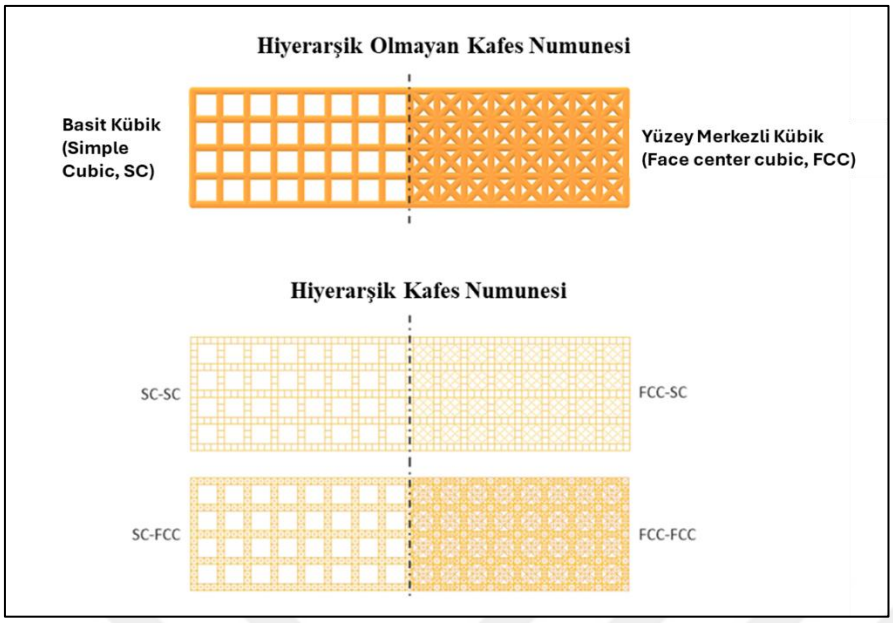
Yüzey tabanlı kafes yapılar, sürekli ve belirli bir düğüm, merkez veya etkileşim noktası olmayan bir araya getirilerek üç boyutlu olarak tekrarlanması ile oluşurlar. Literatürde ilgi alanı olan üçlü periodik minimal yüzey (TPMS/ Triply Periodic Minimal Surface) olarak incelenen yüzey tabanlı kafes yapıların alt kümesidir. Gtroid, Schwarz ve Diamond gibi yapılar bu grupta en çok araştırılan yapılardır. Bu yapı Şekil 3.6'da verilmiştir. Gözenek kontrolü ve doku entegrasyon gibi fonksiyonları optimize etmek için elverişli olan bu yapılar çoğunlukla biyomedikal mühendisliklerinde alanlarında kullanılırlar. Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olmaları nedeniyle diğer mühendislik alanlarında da araştırmaların ilgisini çekmiştir (Andrew ve diğerleri, 2021).



Şekil 3.6. Yüzey tabanlı kafes yapısı örnekleri a) Schwarz elmaz, b) Schoen Gyroid, c) Schoen IWP ve d) Schwarz Primitive

3.2.4. Hiyerarşik kafes yapıları

Hiyerarşik yapılar, diğer hücre yapılarından ayrı olarak, farklı hücre topolojilerinin aynı yapı içerisinde kullanılması sonucu tasarımcının amacı ve yöntemine bağlı olarak düzenli/ düzensiz oluşturulan üç boyutlu kafes yapılarıdır. Örnek kafes yapısı Şekil 3.7'de verilmiştir. Bu yapılar hem çökme hem de darbe dayanımı açısından diğer hücre yapılara göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Lai, Liu, Dai ve Fu, 2025). Bu Hiyerarşik yapıların en büyük avantajı ise gradyan tasarım ve üretimine olanak sağlamalarıdır. Gradyan tasarım kolaylığı ile yapının ilgili bölgesinde farklı mekanik özellikler tasarlanabilme olanağı sunar. Ancak yapıların karmaşık geometriye sahip olması sonlu elemanlar analizlerini ve üretim sonucu modelin doğruluğunu kısıtlar.



Şekil 3.7. Hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan kafes yapısı (Musenich, Stagni ve Libonati, 2023)

Bütün üç boyutlu kafes yapıları değerlendirilmesine bakıldığında, üç boyutlu kafes yapıları sadece geometrik açısından değil üretim teknolojisinin sunduğu avantajlarla mühendislik çalışmalarında araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Her kafes yapısının performans, mekanik ve parametrik ilişkilerinin ayrı ayrı avantajları mevcuttur. Bu yelpaze genişliği birçok farklı ve yenilikçi kafes yapıların çalışılmasın olanak sağlamaktadır. Bu sebeple bu tez çalışmasında üç boyutlu kiriş temelli kafes yapıları temel alınacaktır.

3.3. Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

Kafes yapıları, sergilediği mekanik özelliklerinin yalnızca yapının üretildiği malzemeye değil; aynı zamanda geometrik parametrelere, birim hücre ve konfigürasyonlarına, bağlantı düzlemlerine, gözenek oranlarına, kiriş boyutlarına, kiriş kesitlerine ve bağlantı noktası yönelimlerine bağlıdır. Bu çeşitlilik hem hafiflik hem de dayanım sağlayan çok geniş bir yelpaze de yapıları olması mühendislik araştırma konusu olmuştur. Parametre değişimleri ile elastisite modülü, çökme dayanımı, enerji emilimi, rijitlik dağılımı, burulma limiti, deformasyon modu gibi mekanik özellikler iyileştirilebilmektedir(Gibson ve Ashby, 1997).

Kiriş temelli kafes yapıların mekanik davranışını en çok etkileyen parametrelerden bir tanesi olan hücre topolojisi daha önce bahsedildiği gibi yapının gerilme baskın (strech-dominat)

veya eğilme baskın (bend-dominat) olmasına bağlıdır. Gerilme baskın yapılarda gerilim kiriş eksenine paralel dağıldığı için rijitlik ön plandadır. Bu nedenle taşıyıcı yapı uygulamalarında sıklıkla araştırılır. Eğilme baskın yapılarda ise gerilim aktarımı eğilme yoluyla gerçekleşir bu sebeple elastisite modülleri daha düşüktür. Bu yapılar darbe sönümleyici veya öksetik malzemeler gibi özel mühendislik amaçları için kullanılır.

Bir kafes yapısının gerilme baskın ya da eğilme baskın olduğunu belirlemek için Maxwell kriteri kullanılabilir. Yapıdaki düğüm ve kiriş sayısına bağlı olan bu ilişki, üç boyutlu kafes yapıları içinde Eş. 3.1.' de verilmiştir.

$$M = 3j - b \tag{3.1}$$

Burada j yapıdaki düğüm sayısını, b kiriş sayısını ve M mekanizma sayısını ifade etmektedir. M değeri 0'dan büyük olan yapılarda geometrik olarak aşırı serbest ve yük altında eğilme deformasyon gösterir. Bu sebeple bu yapılar eğilme baskın yapı olarak isimlendirilir. M değeri 0'a eşit veya küçük ise yapı stabil davranış sergiler, yük altında eksenel çalışmaya yönelir. Bu davranışı sergileyen yapılara ise gerilme baskın olarak isimlendirilir.

Kafes yapılarının elastik modülü ile göreceli yoğun arasındaki ilişkiyi en iyi Gibson- Ashby modeli ile açıklamıştır. Gibson-Ashby modeli yapının deformasyon tipini nicel olarak belirlemişlerdir. Gibson-Ashley modeline göre;

$$E^* = C_1 E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^n \tag{3.2}$$

Eş. 3.2'de belirtilen değerler sırasıyla; E yapı elastik modülü, E_s katı malzemenin elastik modülü, ρ^*yapının yoğunluğu, ρ_s katı malzemenin yoğunluğunu ifade eder. Eş. 3.2'de, n katsayısı deformasyon tipini yansıtır. Gerilme baskın yapılar için bu değer yaklaşık 1 iken eğilme baskın yapılarda bu değer yaklaşık 2 ve üzeri olarak gözlemlenmiştir (Gibson ve Ashby, 1997). C_1 katsayısı ise deneyeler ile belirlenen sabit bir katsayıdır (Gibson ve Ashby, 1982).

Kafes yapılarının davranışlarını belirleyen bir başka parametre ise geometrik değişiklerdir. Yapını kiriş yarıçapının, kiriş uzunluğunun ve kiriş yarıçapının kiriş uzunluğa oranı (r/L) en

çok araştırılan geometrik etkenlere bir örnektir. Özellikle ve kiriş yarıçapının kiriş uzunluğa oranı yüksek olan kirişlerin kullanılması eğilme etkisi altında hızlı burkulmasına sebep olur. Bu durum yapının eğilme baskın davranış göstermesinin güçlendirir. Kiriş yarıçapının kiriş uzunluğa oranın yanı sıra kirişlerin kesit alanlarının yapının rijitliğinde etkisi araştırmacıların ilgisi çekmiştir. Araştırmalar sonucunda I-şekilli kesit yapıların tüm yapılarda en yüksek setlik/ağırlık oranını verdiği görülmüştür (Kamranfard, Darijani, Rokhgireh ve Khademzadeh, 2023).

Geometrik tasarım değişikliklerin yanı sıra kafes yapısının birim hücredeki veya kafes yapısının hacim oranı değişimi ile daha iyi mekanik özelliklere sahip yapılar tasarlamak mümkündür (Monkova ve diğerleri, 2021). Literatürde hacim oranı değişimi farklı şekillerde tasarlanmıştır.

Kirişlerin düğüm noktaları ve düğüm noktalarını birbirleri arasındaki açı değişimleri de kafes yapılarının mekanik özelliklerini etkilediği göz ardı edilmemelidir. Düğüm noktalarının açıları gerilme transferini etkileyerek yapının davranışlarını değiştirir. Özellikle öksetik hücrelerde düğüm noktaları arasındaki açı negatif Poisson oranına etkisi büyüktür ve bu etki ile enerji sönümleme karakteristikleri arttırılabilir (Yang, Harrysson, West ve Cormier, 2015).

Öksetik hücreler, hücre duvarlarının içe doğru bükülmesiyle oluşturulan özel bir geometriye sahip yapılardır. Bu içe doğru bükülme sebebiyle öksetik özellik yani negatif Poisson orana sahip olurlar. Negatif Poisson oranın sahip olmalarından kaynaklı olarak bir eksende sıkıştırılmaya başlandıklarında, diğer eksendeki kesit alanları genişler ve negatif Poisson oranına sahip olurlar (Lakes, 1987). Bu özellik sayesinde özellikle enerji sönümlenmesi istenen mühendislik alanlarının başlıca çalışma konularıdır. Yang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmada görülmüştür ki; öksetik bir yapı olan re-entrant yapının darbe enerjisini, geniş bir alana sararak yapının gerilim dağılımını dengelediği ve bu sayede kırılma noktasını uzattığı görülmüştür.

Mekanik davranışları etkileyen bir başka parametre ise hücre yapıların dizilişleridir. Hücre yapıları periyodik düzende, kısmen düzenli veya düzensiz yapıda bulunabilirler. Düzensiz yapılar hücrelerin rastgele veya istatistiksel bir düzenle oluşturulan kafes yapılarıdır. Darbe enerjisi sönümleme ve akustik özellikleri diğer diziliş türlerine oranla daha iyi özellik

gösterirler. Kısmen düzenli yapılar, periyodik ve düzensiz yapıların arasında yer alır. Yapıda düzenli desenler vardır fakat desenler tam olarak tekrar etmez bundan dolayı kısmen düzenli yapı olarak isimlendirilir. Akustik yalıtım, ışık yönlendirme gibi alanlarda sıklıkla kullanılır. Periyodik düzene sahip kafes yapıları ise hücre geometrisi belirli bir düzenle tekrar eder. Tasarım ve analiz kolaylığı sayesinde üretilebilirlikleri ve özelliklerinin öngörülebilirliği diğer dizilimi sahip yapılara oranla çok yüksektir.

Üretim sürecinde ortaya çıkan mikro kusurlar, yüzey pürüzlülükleri, malzeme içi boşluklar gibi üretimden kaynaklı kusurlar da yapının mekanik davranışına etkisi büyüktür. Üretim sorunlar sebebiyle özellikle eklemeli imalat tekniklerinde, deneysel veriler ile sayısal modeller arasında sapmaların ortaya çıkmasına sebep olabilir.

Sonuç olarak, geometrik yapı, birim hücre dizilişleri, düğüm noktaları ve üretim süreçleri üç boyutlu kafes yapılarının mekanik özelliklerinin nasıl şekilleneceğini belirleyen temel parametrelerdir. Bu parametreler sayesinde yapının hangi mühendislik uygulamasın uygun tasarlanacağı tartışılabilmektedir. Teorik modeller, topolojik analizler ve deneysel veriler ile parametre değişimlerinin mekanik özelliklerine etkisi güvenilir şekilde açıklanabilmektedir.

Birim hücrelerin kendi içinde farklı tasarım alternatiflerinin dışında son yıllarda kafes yapılarının farklı topolojik hücrelerin birbirleri ile birleştirilmesi sonucu hem mekanik hem de işlevsel bakımda zenginleştirilmesi araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bir kafes yapısının mekanik özelliklerini iyileştirmek için birim hücrenin tasarım parametreleri dışında farklı kafes yapıları ile birleştirilmesi sonucu oluşturulabilir. Bu birleştirme yöntemi ile mevcut kafes yapısının mekanik olarak zayıf olan özelliğinin aynı özelliği yüksek olan bir kafes yapısı bir araya getirilerek çok yönlü mekanik özellik sağlayan bir yapı elde edilir. Bu yapılar aynı tür olmanın dışında farklı tür kafes yapılarında da sahip olabilir. Raj ve diğerleri (2024), yüzey tabanlı kafes yapılarının yükleme altında burulma sebebi ile hasara yol açtıklarını gözlemlemiş ve bu özelliği geliştirmek için 3 boyutlu re-entrant kiriş temelli kafes yapısı ile birleştirerek yeni kafes yapısı üzerine çalışmışlardır. Benzer bir şekilde Altamimi ve diğerleri (2022), 5 temel kiriş tabanlı kafes yapısını kullanarak oluşturulan, 30 farklı kombinasyondaki kafes yapıları üzerine çalışmış. Çalışmaların sonucunda gerilim baskın, eğilme baskın ya da ikisi beraber gerilmeler altında, hibrit yapıdaki kafes yapıların anizotropik davranışların azaldığı ve toplamda mekanik özellikleri arttığını görmüşlerdir.

Farklı kafes yapılarının bir araya getirilerek yeni bir kafes oluşturma metodolojisi bu tez çalışmasının temeli oluşturmaktadır. Bu bağlamda kiriş tabanlı öksetik bir yapı ile gövde merkezli kübik kafes yapılarının birleştirilmesiyle oluşturulmuş hibrit bir kafes yapısının mekanik ve performansı araştırılacaktır. Bu hibrit kafes yapısının bir sonraki aşamasında gövde merkezli kafes yapısının kiriş yarı çapı değiştirerek katmanlar arasında gradyan değişim oluşturan hibrit bir kafes sistemi tasarlanması amaçlanmıştır.

Gövde merkezli kübik hücre yapısı, birim kübik bir hücrenin köşegenlerinden geçerek kübün merkesinde birleşen kirişlerin bir araya gelerek oluşturduğu bir kafes yapısıdır. Bu yapıda kiriş elemanlar genellikle yüksek simetriye sahiptir. Kirişlerin eğilme yoluyla yük taşması, yapının elastik bölgedeki rijitliğini sınırlandırmaktadır. Fakat darbe altında yüksek sönüm kapasitesi oluşturabilirler (Monkova ve diğerleri, 2021; Cheng, Zhang, Yan, Zhao ve Cui, 2024). Öksetik yapılar ise içe bükümlü kiriş yapılarından meydana gelen, basma yükü altında daralırken çekme yükü altında genişeyerek, sönüm kapasitesini arttırıcı ve darna altında üstün direç sağlayan kafes yapılarıdır.

Gövde merkezli kübik ve öksetik hücre yapılarının ikisininde kendi içinde üstünlükleri vardır. Öksetik hücreler negatif Poisson oranına sahip olmalarından kaynaklı olarak klasik yapıların aksine sıkıştırıldıklarında daralmaya yol açar. Lakes (1987) tarafından yapılan ilk deneysel çalışmalarda yüksek deformasyon altında şekil değiştirme yeteneklerinin olağanüstü olduğu ortaya çıkmıştır. Yang ve diğerleri (2015) re-entrant yapıların klasik altıgen hücrelere oranla enerji kapasitelerinin %40 daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu özelliği sebebiyle öksetik yapılar koruyucu kıyafetlerde ve biolojik uyumlu darbe emici implantlarda tercih edilir. Gövde merkezli kübik yapısı ise simetrik hücre yapısından dolayı topolojiye ve kolay üretim yapılabilmesi en büyük avantajıdır. Geometrik yapısı sayesinde yüklerin çok yönlü olarak dağılmasına olanak sağlar ve izotropik gerilme dağılımı istenen mühendislik uygulamalarında kullanıma elverişlidir. Gövde merkezli kübik yapıların eğilme etkisine rağmen stabil plastik deformasyon göstererek, büyük yük altında çatmadan çalışabilmektedir.

Bu iki yapının avantajları olsa da dezavantajları da mevcuttur. Öksetik hücre yapısının geometrik karışıklığından dolayı üretim sırasında hatalar oluşabilir. Gövde merkezli kübik yapıları ise burkulma nedeniyle lokal çökme riski taşımaktadır. Ayrıca gövde merkezli kübik yapılar gerilim baskın bir yapı kadar sertlik sağlamamaktadır. Bu sebeple yapılar

hibritleştirme yoluyla iki farklı hücrenin avantajlarının kullanarak dezavantajlarının en aza indirecek yeni bir tasarım oluşturulabilir. Bu tez çalışmasında birleştirilen iki kafes yapısından öksetik kafes yapısı negatif Poisson oranına sahip olmasından kaynaklı olarak darbe altında enerji emilimini arttırırken; gövde merkezli kübik yapının ise üretim kolaylığı ve çok yönlü yükleme karakteri sayesinde rijitlik ve taşıma kapasitesini güçlendirecektir. Bu iki yapının birleştirilmesi ile oluşturulan yeni yapı, sertlik ve darbe sönümleme özelliklerini bir araya getirecek stabil bir tasarım elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Gradyan etkisinin yansıtılması ile yapının mekanik cevabının konuma bağlı olarak değiştirmesi beklenmektedir. Bu mekanik karakteristiğin yapıp titreşim sönümleye etkisine ve doğal frekans davranışına etkileri de bu tezin bir çalışma konusu olacaktır.

4. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing, AM), günümüz teknolojisinin gelişmesiyle birlikte geleneksel üretim yöntemlerinin önüne geçerek popüler hale gelmiştir. Bu teknoloji, malzemeleri katmanlar halinde üst üste ekleyerek parçaların üretimini sağlamaktadır. Böylece karmaşık parçaları doğrudan üretme imkânı sunar ve tasarım özgürlüğü oluşturur. Aynı zamanda malzeme israfını %30 ila %60 oranında azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe de olumlu katkıda bulunur.

Eİ sistemleri, bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerini üçgen yüzey ağı (STL) formatında işler ve bu verileri kullanarak malzemeyi kontrollü bir şekilde katman katman biriktirir. Bu sayede hafif, içi boş veya farklı dolulukta yüksek mukavemet ve düşük ağırlıklı yapılar üretilebilir. Eklemeli imalatın temelleri 1980'lerde Chuck Hull tarafından geliştirilen stereolitografi (SLA) teknolojisiyle atılmıştır. SLA, hızlı ön model süreçlerini hızlandırarak ticari uygulamaların yaygınlaşmasını sağlamıştır. 1990'lı yıllarda geliştirilen Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi, metal ve diğer malzemelerle daha geniş uygulama alanları yaratmıştır. 2000'li yıllardan itibaren Elektron Işını Eritme (EBM) ve Seçici Lazer Eritme (SLM) gibi metal odaklı yöntemler, havacılık ve tıbbi sektörlerde kritik parçaların üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda hibrit yöntemler ve çok malzemeli baskı teknolojileri özellikle medikal ekipman üretiminde yaygınlaşmıştır. Her Eİ yöntemi, malzeme uyumu, üretim hızı, yüzey kalitesi ve maliyet gibi farklı kriterlere göre değerlendirilir. Örneğin SLS ve SLM metal tozlarla kullanılırken, SLA daha ince katman kalınlığına sahip sıvı reçineler kullanır.

Eİ yöntemlerinde yaygın olarak polimerler (ABS, PLA, naylon), metaller (Ti-6Al-4V, AlSi10Mg, paslanmaz çelik) ve ileri seramik malzemeler tercih edilir. Kullanılan malzemelerin toz şekli ve reçine viskozitesi, parçaların dayanıklılığı ve yoğunluğunu doğrudan etkiler. AM ile üretilen parçaların mekanik özellikleri üretim parametrelerine bağlı olarak değişir. Örneğin, SLM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçaların çekme dayanımı 900 MPa ‘ya ulaşabilirken, döküm yöntemlerinde bu değer genellikle 800 MPa civarındadır. Eİ ile üretilen parçaların yorulma testleri de yüksek performans göstererek havacılık uygulamalarının gereksinimlerini karşılar. Genellikle bu yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra), üretim parametrelerine bağlı olarak 5 ila 20 µm arasında değişiklik gösterir. Yüzey kalitesini

önemli olan çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğünü artırmak için kumlama, kaplama veya kimyasal işlemler gibi üretim sonrası işlemler uygulanır.

Eİ günümüzde havacılıkta hafif parçalar, medikal alanda kişiye özel implantlar, otomotiv sektöründe karmaşık soğutma kanalları ve prototip üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diş hekimliği ve kuyumculukta ise yüksek detaylı parçaların hızlı üretiminde standart hale gelmiştir. Bu tez kapsamında eklemeli imalat yöntemi olan üç boyutlu yazıcı sistemleri üzerine odaklanılacaktır.

Üç boyutlu yazıcılar genellikle dört temel bileşene sahiptir: Malzeme Besleme Ünitesi, enerji kaynağı, hareket kontrol sistemi ve yazılım. Malzeme besleme ünitesi; malzemeyi sistem içine aktaran bölümdür. Örneğin eriyik yığma modelleme yöntemi (FDM) plastik baskı teli (filament) kullanılırken, toz yataklı sistemlerde ölçülü besleme düzeneği mevcuttur. Enerji kaynağı; malzemeyi eritip şekillendiren ekstrüzyon başlıklarıdır ve tasarıma göre ekstrüzyon başlık kalınlıkları değiştirilebilir. Hareket kontrol sistemi; XYZ eksenlerinde hassas hareket sağlar ve ±0.01 mm hassasiyetle çalışır. Yazılım ise üretim parametrelerini optimize eder ve gerçek zamanlı verilerle üretim hatalarını minimize eder.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Creality K1 Max markasına ait üç boyutlu baskı makinesi kullanılmıştır. Bu makine; akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), akrilonitril stiren akrilat (ASA) ve termoplastik poliüretan (TPU) filamentlerle uyumludur. Bu nedenle tez kapsamında polilaktik asit (PLA) tipi filament tercih edilmiştir. Kullanılan üç boyutlu yazıcıya ait teknik özellikler Çizelge 5.1'de, görseli ise Şekil 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Creality K1 Max 3 boyutlu yazıcı teknik özellikleri

Mekanik Özellik	Değer
Baskı Genişliği	300 mm
Baskı Derinliği	300 mm
Baskı Yüksekliği	300 mm
Nozzle Sayısı	1
Nozzle Çapı	0,4 mm
Nozzle Sıcaklığı	230°
Tabla Sıcaklığı	45°
Yazma Hızı	600 mm/s



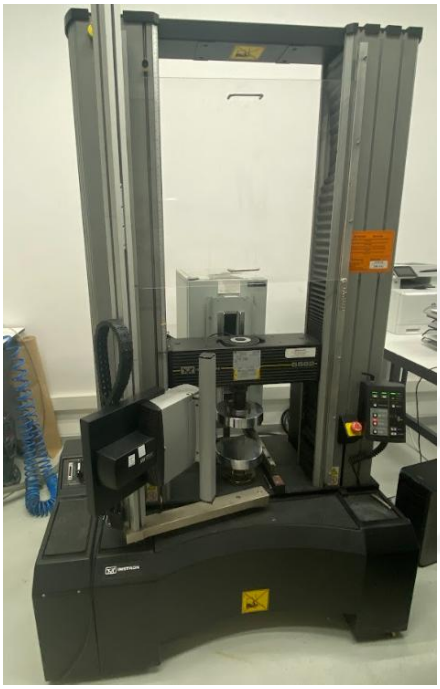
Şekil 5.1. Tez çalışmasında kullanılan 3 boyutlu yazıcı

Bu çalışmada incelenen kafes yapılar, eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş olup baskı sürecinde Robo90 marka PLA Plus filament kullanılmıştır. Deneysel numunelerin üretiminde hem beyaz hem de yeşil renkli PLA Plus filamentler tercih edilmiştir. Kullanılan filamentlerin nominal çapı 1,75 mm olup üretici tarafından belirtilen çap toleransı ±0.05 mm'dir. Baskı işlemleri sırasında üretici teknik dokümantasyonunda önerilen işlem parametreleri esas alınmış; hotend (nozzle) sıcaklığı 190–220 °C, baskı tablası (hotbed) sıcaklığı ise 50–70 °C aralığında tutulmuştur. Filamentin baskı hızı aralığı 40–300 mm/s olarak belirtilmiş olmakla birlikte, deneysel çalışmalarda kararlı ve tekrarlanabilir bir üretim sağlamak amacıyla bu aralık içerisinde sabit ve kontrollü baskı parametreleri kullanılmıştır. Her bir filament bobini 1 kg (1000 g) ağırlığında olup, kullanılan PLA Plus malzeme, mekanik dayanım ve baskı kararlılığı açısından kafes yapıların deneysel olarak değerlendirilmesi için uygun bir termoplastik malzeme olarak seçilmiştir. Farklı renkli filamentlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu varsayılmış ve tüm numuneler aynı baskı parametreleri altında üretilmiştir.

Malzemenin çekme deneyleri ile elastik modülü ve akma gerilmesi belirlenmiştir. Çekme testlerinde INSTRON 5582 test cihazı kullanılmıştır. INSTRON 5582 test cihazı görseli Şekil 5.2'de, teknik özellikleri ise Çizelge 5.2'de verilmiştir. Test sistemi tarafından kaydedilen kuvvet değerleri, cihazın üretici teknik dokümantasyonunda belirtilen yük ölçüm doğruluğu esas alınarak değerlendirilmiştir. Instron 5582 test sisteminin yük ölçüm doğruluğu, okunan değerin ±0.5'i mertebesinde olup, bu değer belirsizlik hesaplarında cihaz kaynaklı belirsizlik (Tip B) bileşeni olarak dikkate alınmıştır. Tekrarlı deneylerden elde edilen ölçüm saçılmaları ise istatistiksel yöntemler kullanılarak tekrarlanabilirlik kaynaklı belirsizlik (Tip A) kapsamında değerlendirilmiştir. Bu iki belirsizlik bileşeni, ISO GUM kılavuzunda tanımlanan birleşik belirsizlik yaklaşımı doğrultusunda birleştirilmiş ve genişletilmiş belirsizlikler %95 güven düzeyi için k = 2 kapsama faktörü kullanılarak hesaplanmıştır. Test düzeneği ile ilgili detaylar ve belirsizlik analizleri diğer bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen basma ve çekme testleri, plastik malzemelerin basma altındaki mekanik davranışlarını tanımlayan ASTM D695 standardı esas alınarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, belirtilen standartta tanımlanan yükleme prensipleri ve ölçüm yaklaşımı dikkate alınarak test edilmiştir. ASTM D695 standardı kapsamında, basma ve çekme yükü altında gerilme–gerinim davranışının güvenilir biçimde elde edilmesi

amaçlanmış; yükleme hızı, ölçüm yöntemi ve veri kaydı bu doğrultuda düzenlenmiştir. Basma testlerinde, kafes yapıların katı numunelere kıyasla farklı geometrik özellikler sergilemesinden kaynaklı olarak standartta tanımlanan esaslar korunarak testler yapı geometrisine uygun şekilde uygulanmıştır. Böylece elde edilen deneysel sonuçların, plastik esaslı kafes yapıların basma davranışını temsil etmesi ve literatürle karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır.



Şekil 5.2. INSTRON 5582 test cihazı

Çizelge 5.2. INSTRON 5582 test cihazı teknik özellikleri

Mekanik Özellik	Değer
Yükleme Kuvveti	2-10 kN
Hız	0,05-500 mm/dk
Sıcaklık	-70 – 300 derece

Tez çalışması kapsamında malzememe izotropik kabul edilmiş, modelde gözlenen anizotropik davranışın yalnıca geometrik topolojiden kaynaklandığı varsayılmıştır. Bu doğrulturda oluşturulan kafes yapısı PLA malzemesinden üretilmiş olmakla birlikte, hücre topoloji nedeniyle geometrik anizotropi sergilemektedir. Malzeme modeli yalnızca PLA'nın

yerel mekanik davranışlarını temsil ederken, kafes yapısının yönsel davranışları hücre geometrisi tarafından belirlenmiştir.

Tez kapsamında, deneysel testler ve sayısal modellemeler için tek bir hibrit hücre esas alınmıştır. Bu birim hücre kullanılarak, farklı hücre sayılarında ve ölçeklerde sayısal modeller oluşturulmuştur. Tez çalışması dört temel aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada PLA'nın malzeme değerlerinin belirlenmesinin ardından 100x100x100 mm boyutlarında tek bir birim hücre üretilmiş ve basma testleri gerçekleştirilmiştir. Basma testleri için çekme testlerinde kullanılan düzenek kullanılmıştır. Testten elde edilen kuvvet-yer değiştirme verileri ile LS-DYNA ortamında oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrulama ile tanımlanan MAT24 kartı, temas parametreleri, sürtünme katsayılarının gerçek davranışı temsil ettiği gösterilmiştir.

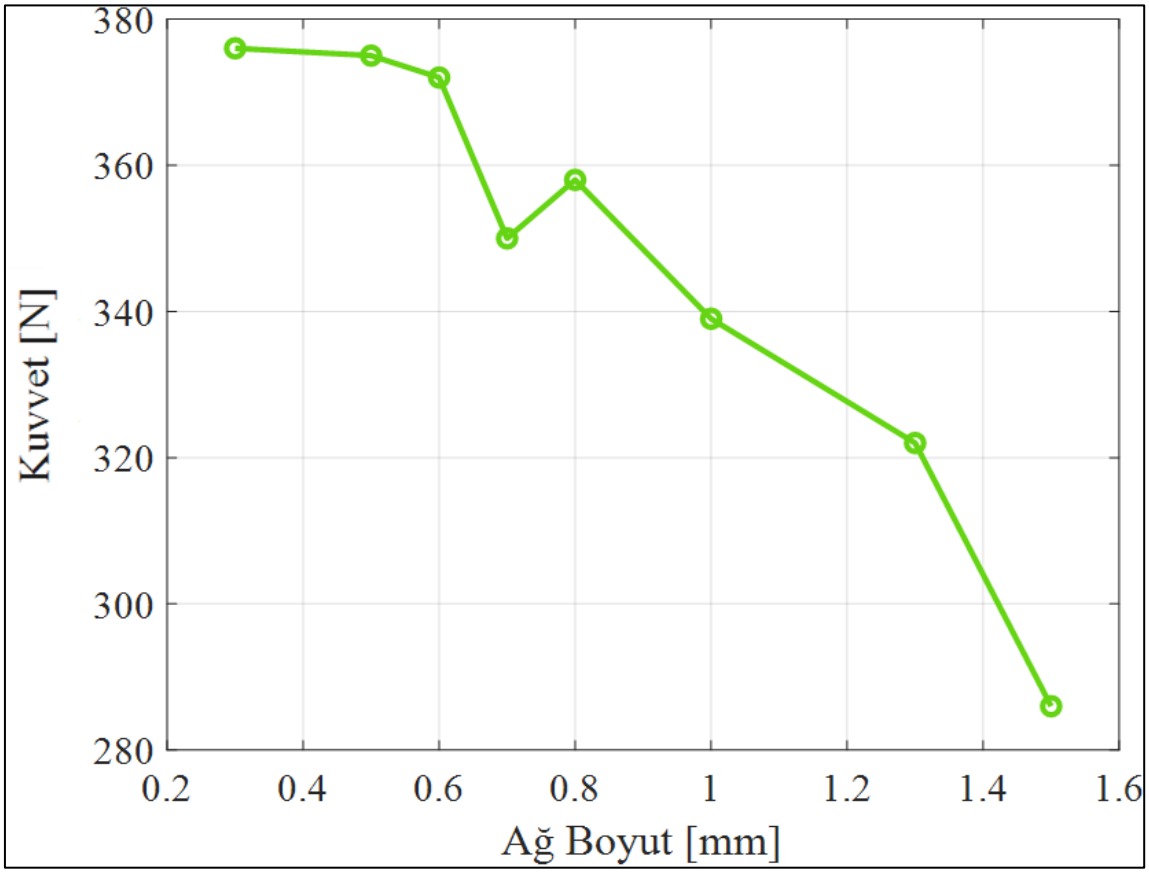
İkinci aşamada, test düzeneğinde kullanılan birim hücre tüm boyutları aynı oranda küçültülerek ölçeklendirilmiş model elde edilmiştir. Bu ölçeklendirilmiş model 3x3x3 kafes sistemindeki bir birim hücreye eşit olarak şekilde ölçeklendirme yapılmıştır. Bu model de kullanılan malzeme, model parametreleri, sınır ve başlangıç koşulları 100x100x100mm boyutlarındaki birim hücre ile aynı tutulmuştur. Böylece yalnızca geometrik ölçek farkının mekanik davranış üzerine etkisi net bir şekilde görülmesi amaçlanmıştır. Her iki modelin kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiş ve bu değerler üzerinden etkin gerilim-gerinim eğrileri karşılaştırılmıştır.

Üçüncü aşamada, aynı birim hücre 3x3x3 yönünde çoğaltılarak kafes sistemi oluşturulmuştur. Elde edilen yapı, 100x100x100 mm dış zarf boyutların sahip olacak şekilde modellenmiştir. Aynı malzeme, model parametreleri, sınır ve başlangıç koşulunda yapının mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Son aşamada ise 3x3x3 kafes sistemi katmanlar arasında göreceli değişimi ile gradyan kafes sistemine dönüştürülmüştür. Aynı malzeme, model parametreleri, sınır ve başlangıç koşulları altında mekanik özellikleri belirlenerek karşılaştırması yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde ağ yapısı HYPERMESH tarafından oluşturulmuştur. Optimum hacim ağın boyutunun belirlemek için farklı hacim ağ boyutlarında birim hibrit

kafes yapısı tasarlanmıştır. Analiz süresi ve model doğrulu göz önüne alarak hacim ağ boyutu belirlenmiştir. 1,5 mm, 1,3 mm, 1,0 mm, 0,8 mm, 0,7 mm, 0,6 mm, 0,5 mm ve 0,3 mm hacim ağ boyutlarında ağ yapısı örülerek modeller üstünden aynı sıkıştırma bölgesinde kuvvet değerleri okunmuştur. En düşük mesh ağı olan 0,3 mm ağ boyutu referans alınarak ağ boyutunun yüzdesel değişimi Çizelge 5.3'te verilmiştir. Kuvvet ve yer değiştirme değerlerinin ağ boyutu ile değişimi Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Kuvvetin ağ boyutuma göre değişimi

Çizelge 5.3. 0,3 mm ağ yapısına göre ağ boyutunun yüzdesel değişimi

Ağ Boyutu	Kuvvet [N]	Kuvvet Farkı [%]
0,3	376,07	0,00
0,5	375,20	0,23
0,6	371,85	1,12
0,7	350,47	6,81
0,8	357,50	4,94
1,0	339,37	9,76
1,3	321,96	14,39
1,5	286,07	23,93

Farklı ağ modellerinden elde edilen ağ boyutu ve kuvvet değerleri incelendiğinde 0,3 – 1,5 mm aralığındaki ağ modellerinde, 0,7 mm altındaki ağ boyutlarının kuvvet değerleri değişimi ise %5 altında kaldığı görülmüştür. Bu değerler kiriş temelli kafes yapılarında ince kesit yapısı nedeniyle kaçınılmaz olan sınırlı seviyede dalgalanmaların kabul edilebilir ve sınırlar içinde olduğu görülmektedir. Analiz çözüm sürelerinin ve hesaplama maliyetleri göz önüne alındığında 0,3 – 0,7 mm aralığının görece sabit olduğu görülmüştür. Bu nedenle, düzenli ve gradyan kafes yapıları için ağ yapısı kiriş yarıçapına oranlanarak 0,7 mm altında tutulmuştur.

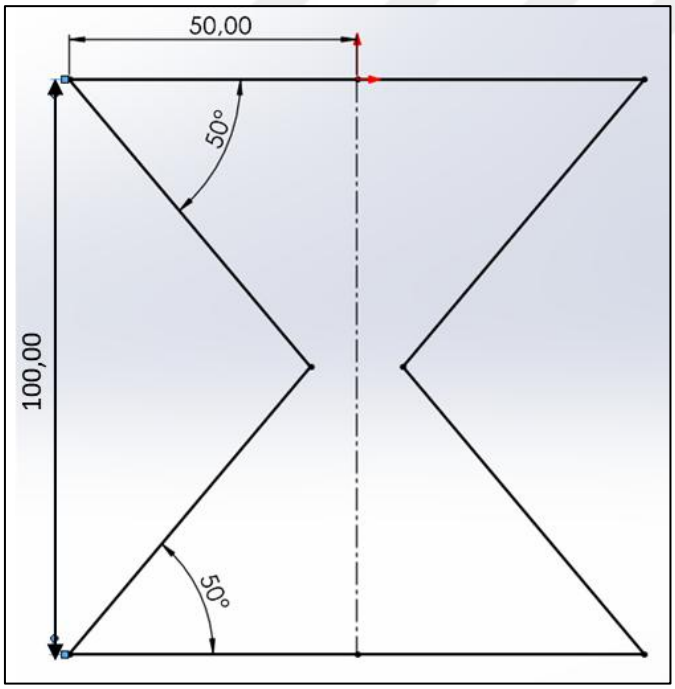
Her aşamaya ait tasarımlar, karşılaştırmalar ve hesaplar diğer bölümlerde detaylı olarak sunulmuştur.

6. ANALİZ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

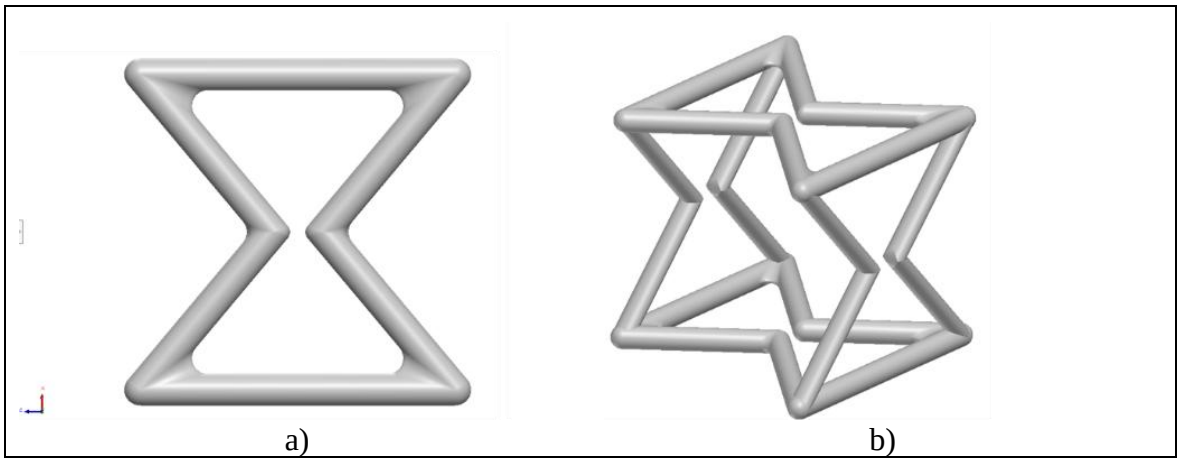
6.1. Hibrit Hücre Konsept Tasarımı

Tez çalışmasında geometrik modelleme süreci için SOLIDWORKS yazılımı kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde ele alınan literatür çalışmaları incelendiğinde, bir yapının öksetik özellik gösterebilmesi için içe doğru eğimli kirişlerin yüzeyle 20° ile 60° arasında bir açı oluşturması gerektiği belirlenmiştir (Shen ve diğerleri, 2021; Yang ve diğerleri, 2012).

Bu bilgi doğrultusunda, öksetik yapı tasarımı için 20° ile 60° arasındaki farklı açı değerleri denenmiştir. Ancak geometrik kısıtlamalar nedeniyle içe bükümlü kirişler için uygun değer açı değeri 50° olarak belirlenmiştir. Böylece, kirişlerin yüzeyle 50° açı yaptığı özgün bir öksetik yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öksetik yapının geometrik boyutları ve genel görünümü Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir.

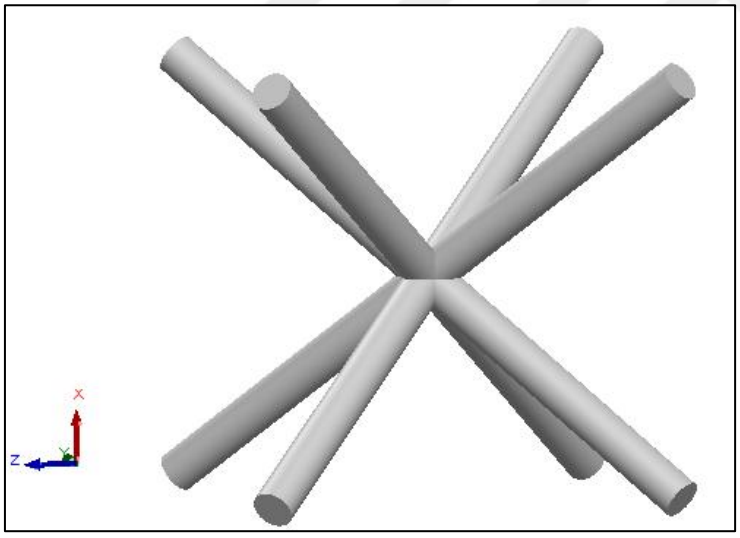


Şekil 6.1. Öksetik hücre geometrisi



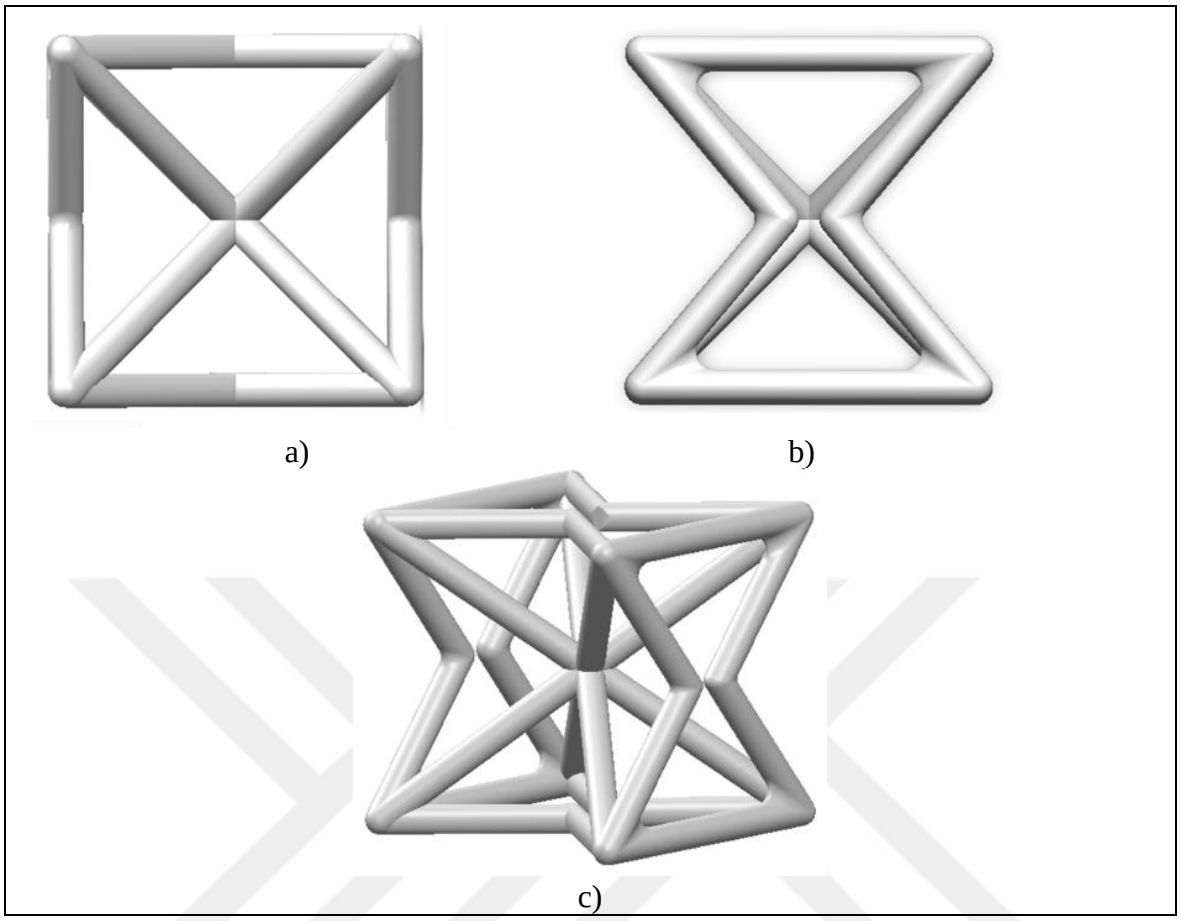
Şekil 6.2. Öksetik yapı tasarımı a) Üst görünüm, b) İzotropik görünüm

Tasarım ve üretim kolaylığı ve yük kaldırma kapasitesi göz önüne alındığında öksetik yapını her köşeni birleştirecek şekilde, yapıyla aynı yarıçapa sahip gövde merkezli kübik (GMK) hücre yapısı tasarlanmıştır. Bu gövde merkezli kübik tasarımı Şekil 6.3'te sunulmuştur.



Şekil 6.3. Gövde merkezli kübik tasarımı

Nihai tasarım için öksetik ve gövde merkezli kübik yapı birleştirilmiştir. Sonuç olarak, tüm yönlerden simetrik hibrit birim hücre yapısı elde edilmiştir. Oluşturulan hibrit yapının tasarımı Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Hibrit kafes tasarımı a) Ön görünüm, b) Yan görünüm ve c) İzotropik görünüm

6.2. Deneysel Çalışma

Tez çalışmasında analitik çalışmaların doğruluğunu incelemek için öncelikli olarak birim hibrit yapısının deneysek testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım üç boyutlu yazıcı kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarımda PLA malzemesi kullanılmıştır. Literatürde PLA malzemesi için birçok sayısal değer verilmiş olunsa bile üretim sürecinin, baskı parametrelerinin ve çevresel etkilerin malzemesinin mekanik özelliklerine etkisi olmaktadır. Bu karmaşanın önüne geçmek için birim hibrit kafes yapısı ile aynı üretim sürecinde malzeme testlerinin gerçekleştirilmesi için çekme testi numuneleri hazırlanmış.

Deneysel çalışmada, öncelikli olarak çekme testi numuneleri ile malzeme karakteristiği belirlenmiştir. Sonrasında birim hibrit hücrenin basma karakteristiği belirlenmesi için yarı-statik testler yapılmıştır. Deneysel çalışma detaylar diğer bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

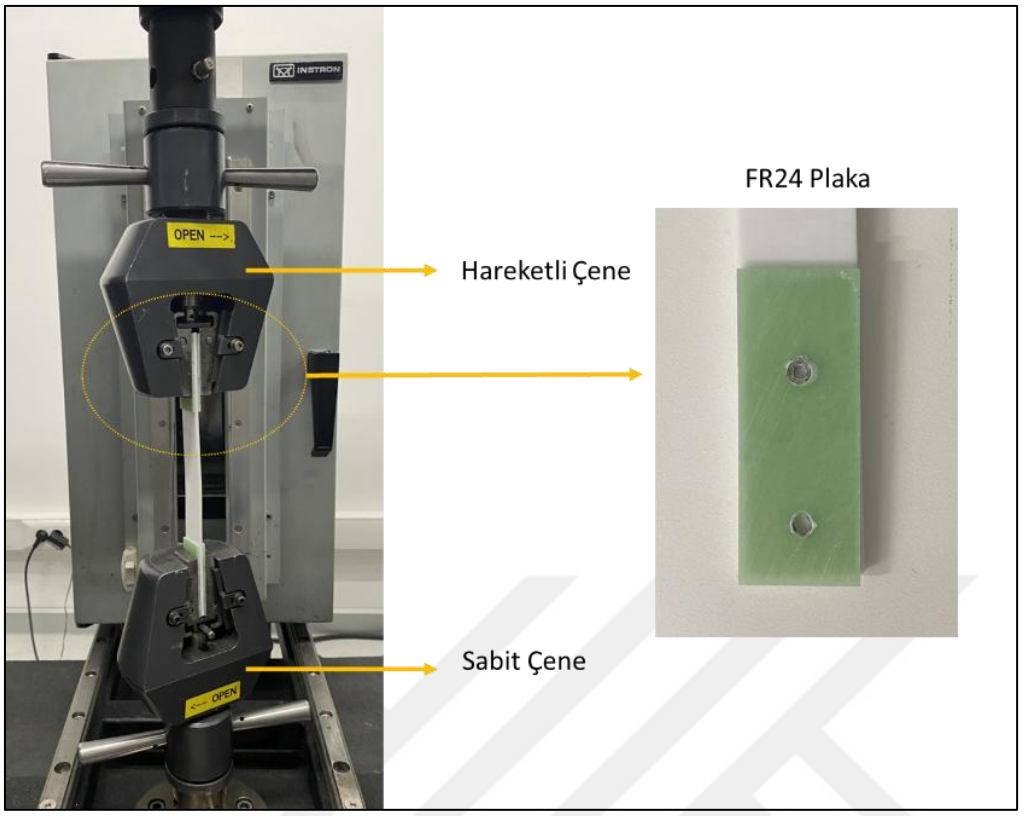
6.2.1. Çekme testi

Analiz çalışmalarının temelini, kullanılacak malzeme modelinin doğru belirlenmesi oluşturmaktadır. Bu kapsamda, hibrit kafes yapısının üretiminde kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin elde edilmesi amacıyla, aynı üretim süreci kullanılarak üç adet çekme testi numunesi hazırlanmıştır. Çekme testi numuneleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



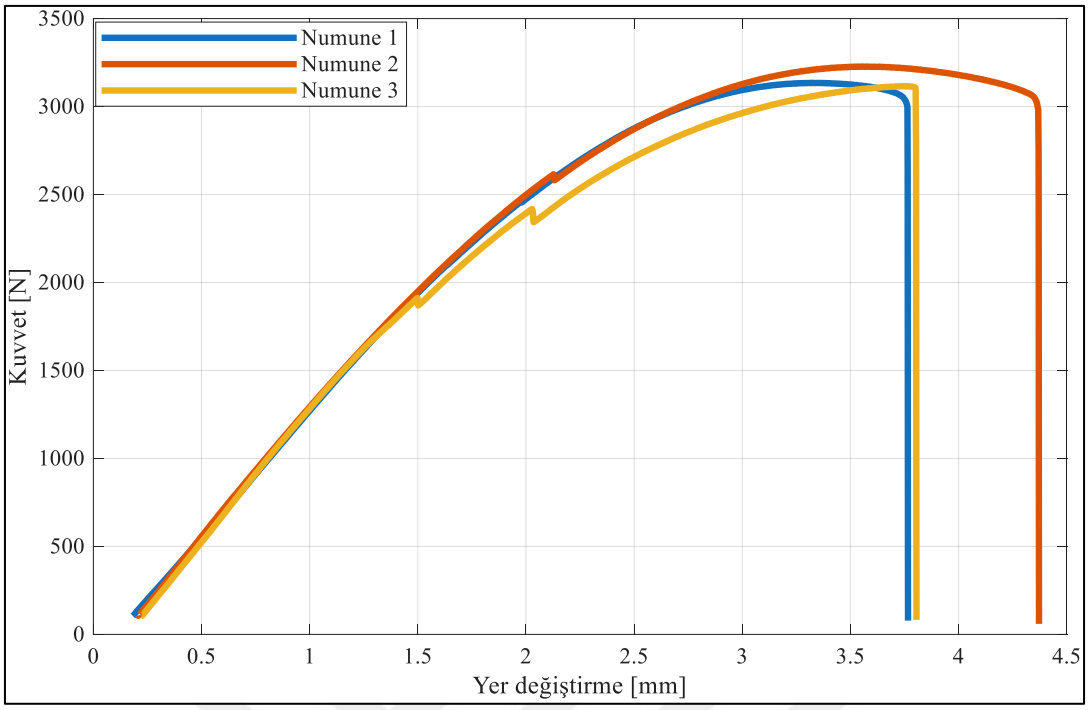
Şekil 6.5. Çekme testi numuneleri

Çekme testlerinde Instron 5582 model çekme-basma test cihazı ile kullanılmıştır. Test cihazının teknik özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. 250x25x3 mm boyutlarındaki çekme numunelerinin uç kısımlarına, FR24 destek levhaları yapıştırılmıştır. Numuneler, alt çene sabit kalacak şekilde yerleştirilip; üst çene 2 mm/dk ile yukarı yönde hareket ettirilmiştir. Numunelerde kopma meydana gelene kadar test sabit hızla sürdürülmüş ve bu işlem her üç numune için de tekrarlanmıştır. Test düzeneği Şekil 6.6'te verilmiştir.



Şekil 6.6. Çekme testi düzeneği

Her üç numene için test ile eş zamanlı olarak kuvvet ve uzaman verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen verilerden elde edilen kuvvet – yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Üç numuneye ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 6.7'de sunulmuştur. Bu veriler, daha sonra gerilme-gerinim değerlerine dönüştürülerek malzeme modelinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Kuvvet ve yer değiştirme değerleri Eş 6.1. ve Eş 6.2. yardımıyla gerilim-gerinim ilişkisine dönüştürülmüştür. Numunelere ait gerilme-gerinim eğrileri Şekil 6.8'de sunulmuştur.



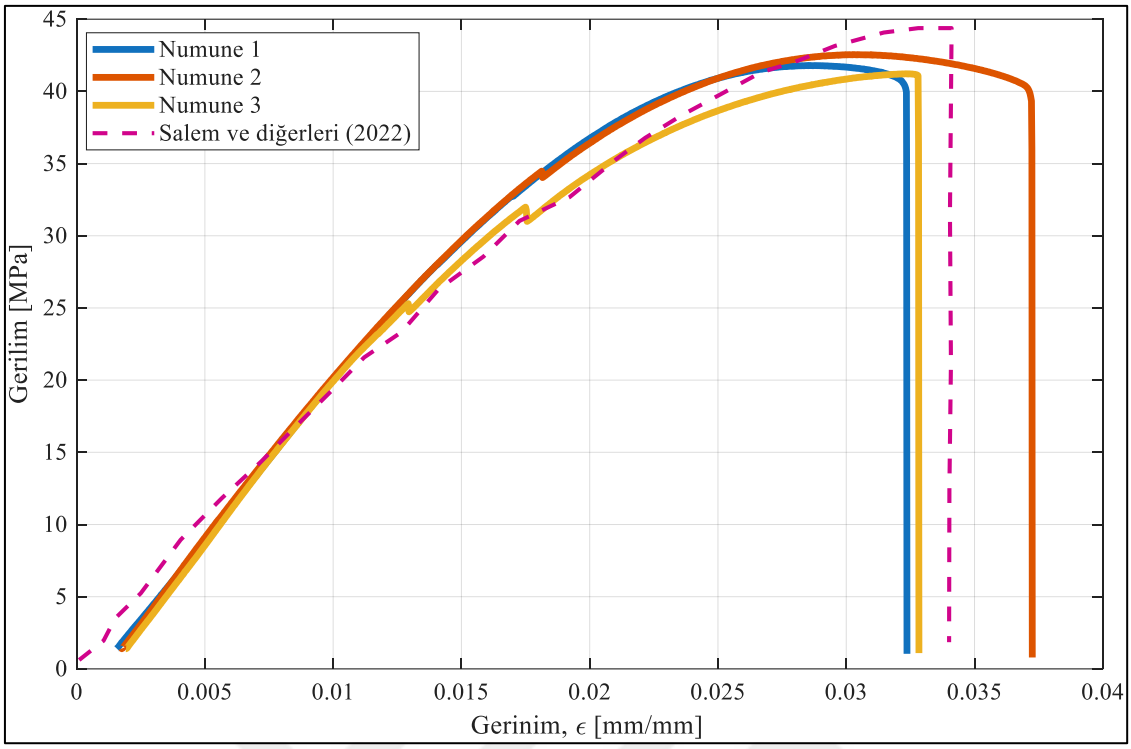
Şekil 6.7. Çekme testi numunelerinin kuvvet- yer değiştirme eğrisi

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{6.1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_s - l_0}{l_0} \tag{6.2}$$

Eş 6.1.'de F, çene tarafından numuneye uyguladığı kuvveti; A_0, numunenin ilk boyutuna ait kesit alanını ifade etmektedir. Eş 6.2.'de ΔL, numunenin son boyu (L_s) ile ilk boyu (L_0) arasındaki farkı göstermekte olup $\Delta L = (L_s - L_0)$ şeklinde tanımlanır. Burada L_s, numunenin son boyudur ve bu değer numunenin ilk boyuna çenenin saniyelik hareket miktarının eklenmesiyle elde edilmiştir.

Elde edilen gerilim- gerinim eğrileri, literatürde PLA malzemesi için gerçekleştirilen çekme testi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonuçları ve test numunelerine ait gerilim- gerinim eğrisi Şekil 6.8'de sunulmuştur.



Şekil 6.8. Çekme testi numuneleri gerilim-gerinim eğrisi ve literatür karşılaştırılması (Salem, Abouchadi ve Elbikri, 2022)

Çizelge 6.1. Çekme Testi Belirsizlik Bileşenleri

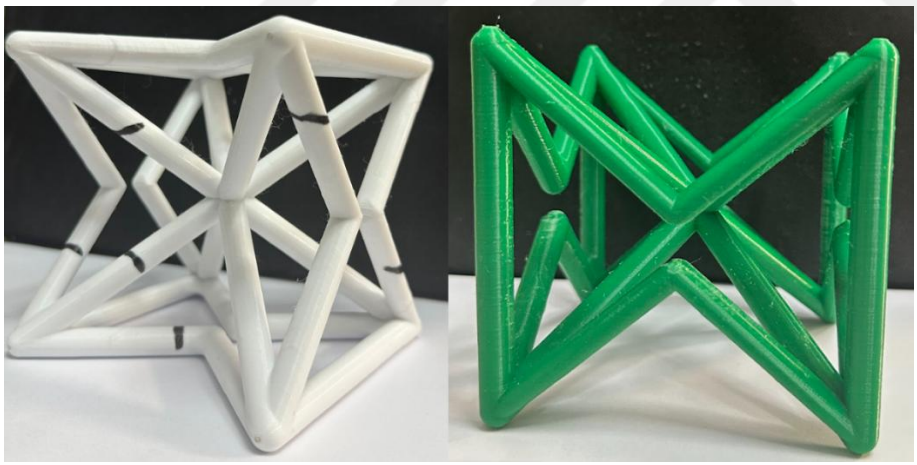
Yer değiştirme (mm)	Ortalama kuvvet (N)	Tekrar kaynaklı belirsizlik (N)	Cihaz kaynaklı belirsizlik (N)	Birleşik standart belirsizlik (N)	Birleşik standart belirsizlik (%)	Genişletilmiş belirsizlik (k = 2) (N)
0,5	543,04	9,98	1,56	10,10	1,86	20,21
1,0	1282,2	6,2	3,70	7,28	0,56	14,57
1,5	1926,43	18,39	5,56	19,21	0,99	38,42
2,0	2446,27	40,59	7,06	41,20	1,68	82,40
2,5	2820,15	53,27	8,14	53,89	1,91	107,79
3,0	3061,75	50,27	8,81	51,04	1,66	102,08

Çizelge 6.1'de, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda elde edilen kuvvet–yer değiştirme verilerine ait ortalama değerler ve bu değerlere karşılık gelen belirsizlik bileşenleri sunulmuştur. Aynı yapıya ait üç farklı numune üzerinde gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir yer değiştirme seviyesinde ortalama kuvvet değeri hesaplanmış, ölçüm tekrarlanabilirliğinden kaynaklanan belirsizlik (Tip A) ile kullanılan test cihazının teknik özelliklerinden kaynaklanan belirsizlik (Tip B) ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Düşük yer değiştirme seviyelerinde belirsizliğin

ağırlıklı olarak ölçüm tekrarlanabilirliğinden kaynaklandığı, yer değiştirme arttıkça ise numuneler arasındaki deformasyon davranış farklılıklarının Tip A belirsizliğini artırdığı görülmektedir. Cihaz kaynaklı belirsizlik katkısının tüm yükleme aralığı boyunca sınırlı kaldığı ve toplam belirsizlik üzerinde ikincil bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Birleşik standart belirsizlik değerlerinin incelenen yer değiştirme aralığında ortalama kuvvetin yaklaşık %0,6–2'si mertebesinde kaldığı, genişletilmiş belirsizlik değerlerinin (k = 2) ise %95 güven düzeyinde çekme testi sonuçlarının güvenilirliğini ortaya koyduğu söylenebilir.

6.2.2. Basma testi

Hibrit yapının malzemeden bağımsız olarak öksetik davranışını ve basma yükü altındaki karakterizasyonu belirlemek amacıyla, çekme testi numuneleriyle aynı üretim süreci kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarında birim hibrit kafes yapısı üretilmiştir. Üretilen hibrit yapının genel görünümü Şekil 6.9'da sunulmuştur.



Şekil 6.9. Test numuneleri (Hibrit birim kafes yapısı)

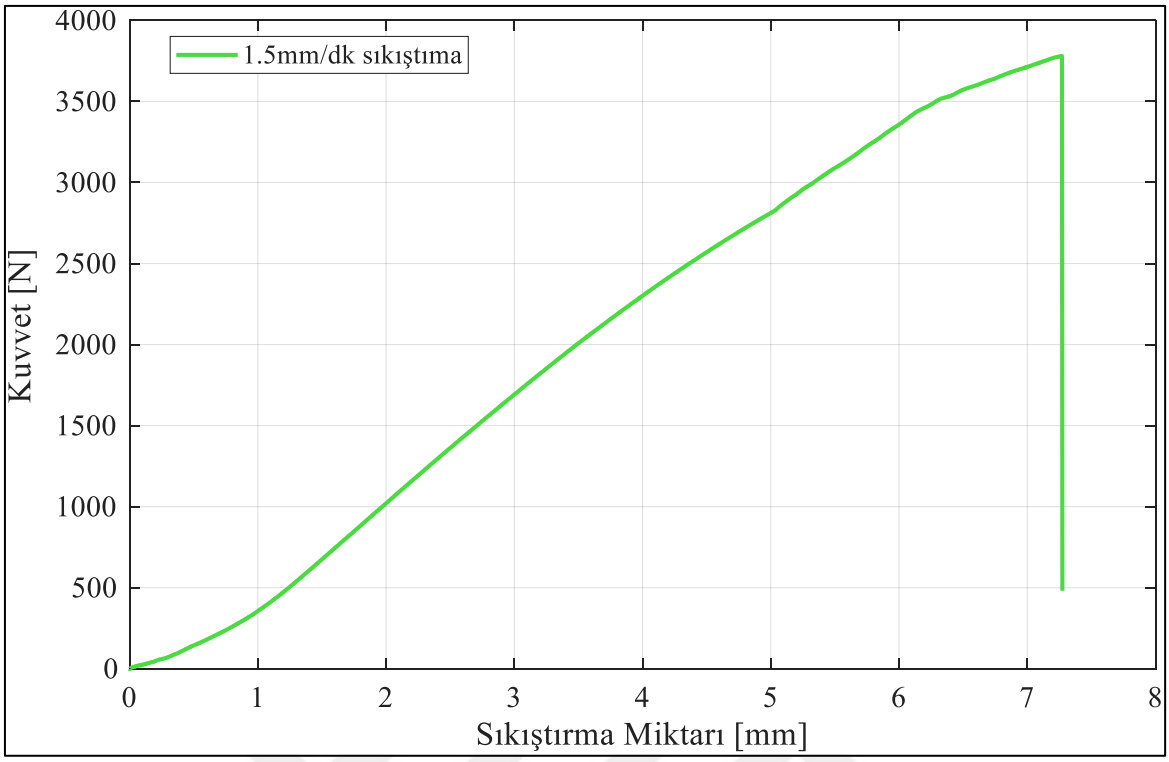
Basma testleri, çekme testlerinde kullanılan Instron 5582 model cihaz üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde, cihazda yer alan çekme çeneleri çıkartılarak yerinde basma çeneleri takılmıştır. Deney düzeneği ve numunenin cihaz üzerindeki konumu Şekil 6.10'da sunulmuştur.



Şekil 6.10. Basma test düzeneği

Hibrit numunelerin basma testler ASTM D695 standartı temel alınarak 1.5 mm/dk yükleme hızı ile sıkıştırılmıştır. Aynı boyutlarda üretilen 3 numune için ayrı ayrı testler tekrarlanmıştır. Test süreci boyunca, çenelerdeki yük hücresi aracılığıyla kuvvet değerleri ve yer değişme miktarı eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 6.11'de sunulmuştur. Bu veriler sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılan hibrit kafes yapının, analiz modelinde tanımlanan sınır koşullarının ve yükleme yaklaşımının doğruluğunun değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu değerler yardımıyla sayısal modelde kullanılan temas tanımları, sınır koşulları ve sürtünme katsayıları gibi parametrelerin deneysel davranışı ne ölçüde temsil ettiği belirlenmiştir. Böylece, birim hibrit yapısının deneysel verileri sayısal modellemede yapılan varsayımların ve kısıtlamaların gerçekçi olup olmadığının doğrulanmasında temel referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.11. Basma testi sonucu kuvvet- yer değiştirme eğrisi

Çizelge 6.2. Basma Testi Belirsizlik Bileşenleri

Yer değiştirme (mm)	Ortalama kuvvet (N)	Tekrar kaynaklı belirsizlik (N)	Cihaz kaynaklı belirsizlik (N)	Birleşik standart belirsizlik (N)	Birleşik standart belirsizlik (%)	Genişletilmiş belirsizlik (k = 2) (N)
0,5	127,91	11,73	0,37	11,73	9,17	23,47
1,0	322,08	30,93	0,93	30,94	9,61	61,88
1,5	608,46	57,98	1,76	58,00	9,53	116,01
2,0	913,40	84,94	2,64	84,98	9,30	169,97
2,5	1212,89	111,22	3,50	111,27	9,17	222,54
3,0	1501,74	136,54	4,34	136,61	9,10	273,22

Çizelge 6.2'de sunulan karşılaştırmalı sonuçlar, yer değiştirmeye bağlı olarak ortalama kuvvet ve belirsizlik bileşenlerinin birlikte nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. İncelenen tüm yer değiştirme seviyelerinde ölçüm tekrarlanabilirliğinden kaynaklanan belirsizliklerin, cihaz kaynaklı belirsizliklere kıyasla baskın olduğu görülmektedir. Bu durum, belirsizliklerin esas olarak test sisteminden değil, numunelerin deformasyon davranışındaki farklılıklardan kaynaklandığını göstermektedir. Yer değiştirme arttıkça ortalama kuvvetle birlikte mutlak belirsizlik değerlerinin de artmasına rağmen, göreli belirsizlik oranının

yaklaşık %9–10 seviyesinde sabit kalması, deneysel ölçümlerin ölçekli ve tutarlı bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen genişletilmiş belirsizlik değerleri (k = 2), %95 güven düzeyinde deney sonuçlarının değerlendirilmesine imkân tanımakta ve yapının mekanik davranışının güvenilir biçimde temsil edildiğini göstermektedir.

6.3. Analitik Çalışmalar

Bu bölümde, deneysel çalışmalarla paralel olarak gerçekleştirilen sayısal analizler ve sonuçları sunulmaktadır. Analizde kullanılan modeller, SOLIDWORS ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan her bir CAD model geometrisi HYPERMESH yazılımına aktarılmıştır. HYPERMESH yazılımında hibrit yapının karmaşık üç boyutlu geometrik formu göz önünde bulunarak hacim ağ yapısı (volume mesh) ile oluşturulmuştur. Volume mesh yöntemi, modelin yalnızca yüzeyini değil, iç hacmini de elemanlarla temsil etmesinden kaynaklı olarak gerçek üç boyutlu gerilme ve deformasyon dağılımlarının doğru biçimde analiz edilebilmesini sağlamıştır. Bu yaklaşım, özellikle kiriş temelli kafes yapılarındaki düğümlerdeki gerilme yığılmalarının ve yerel deformasyonlarının gerçeğe yakın biçimde yakalanmasına olanak sağlamıştır. Ağ yapısı boyutunun yer değiştirme, kuvvet, analiz maliyetleri ve analiz süresi göre seçilmiştir.

Hazırlanan sonlu elemanlar modeli, LS-DYNA yazılımında çözüme alınmıştır. LS-DYNA sonlu elemanlar çözümlerinde explicit (açık zaman adımlı) ve implicit (örtük zaman adımlı) çözüm imkânları sunmaktadır. Explicit çözüm özellikle yüksek hızda çarpma, darbe, göçme ve patlamak gibi kısa süreçlerde gerçekleşen olayların sonlu elemanlar çözümünde kullanılırken, implicit çözüm düşük hızda yükleme içeren yarı statik (quasi-static) yüklemeler için uygundur. Bu kapsamda tez çalışmasında gerçekleştirilen statik basma ve çekme testleri için implicit çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu çözüm yönteminde her adımda denge denklemlerini iteratif olarak (Newton-Raphson yöntemiyle) çözerek sistemin denge durumuna ulaşması sağlanır. Bu sayede, atalet etkileri göz ardı edilerek kuvvet-deformasyon ilişkisi doğru biçimde hesaplanmış olur.

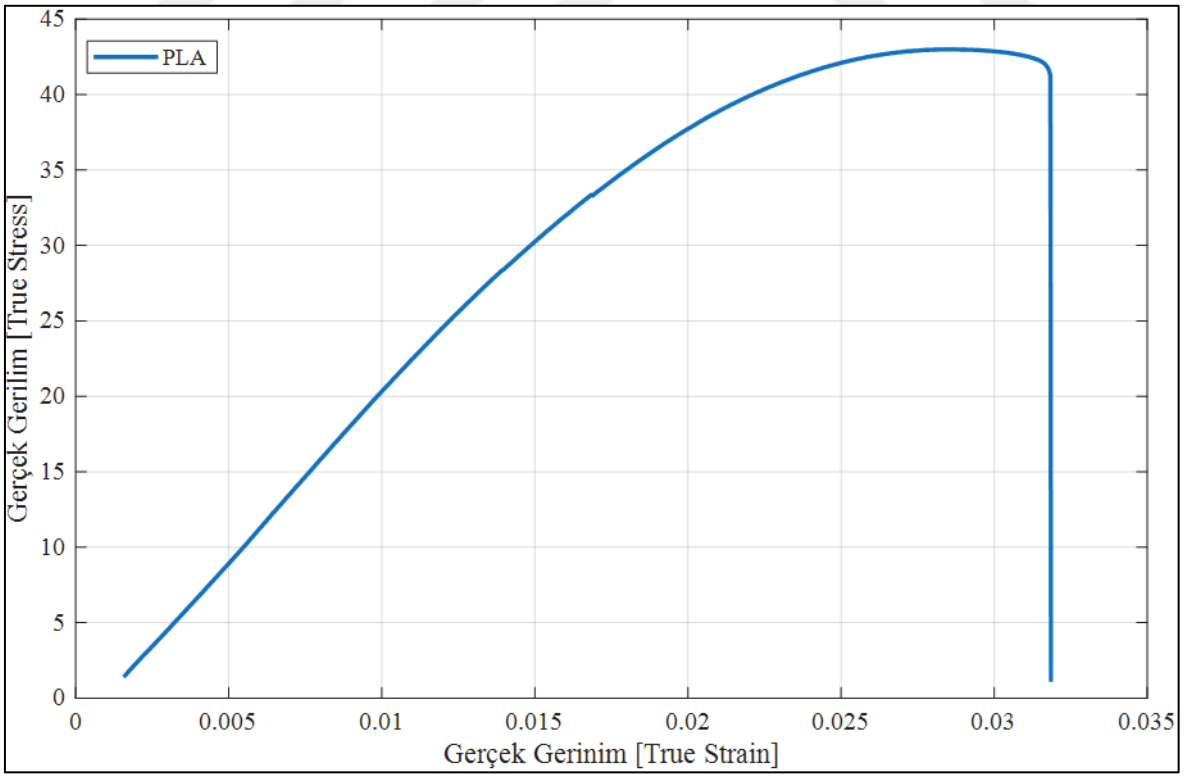
LS-DYNA sonlu elemanlar modellerinde ilk olarak, çekme testi ile elde edilen PLA malzemesinin mekanik özelliklerinin doğrulaması yapılmıştır. Bu doğrulama işleminden önce, LS-DYNA analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için mühendislik gerilim-gerinim değerlerinin gerçek (true) gerilim-gerinim değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Gerçek gerinim (ε_{true}) ve gerçek gerilme (σ_{true}) değerleri, aşağıdaki denklemler yardımıyla mühendislik gerilim-gerinim değerlerinden elde edilmiştir:

$$\varepsilon_{true} = \int_{L_0}^{L} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{mühendislik}) \tag{6.3}$$

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A} = \sigma_{mühendislik}(1 + \varepsilon_{mühendislik}) \tag{6.4}$$

Burada Eş. 6.3'te numunenin uzunluğundaki (L) oransal değişimi logaritmik olarak tanımlayarak gerçek gerinimi ifade etmektedir. Eş. 6.4'te ise yükleme sırasındaki kesit alanındaki küçülmesi dikkate alarak gerçek gerilemeyi tanımlar. Burada anlık kuvvetin (F) o andaki kesit alanına (A) oranıdır. Böylece mühendislik gerilmesinin ($\sigma_{mühendislik}$) üzerine gerinim etkisini ekleyerek gerçeğe daha yakın gerilme değeri elde edilmesini sağlamıştır. Bu dönüşümün sebebi LS-DYNA yazılımında kullanılan malzeme modelinin gerçek gerinim ve gerilim değerleri üzerinden tanımlanması gerekliliğidir. PLA malzemesine ait gerçek gerilim- gerinim eğrisi Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.12. PLA malzemesinin gerçek gerilim- gerinim eğrisi

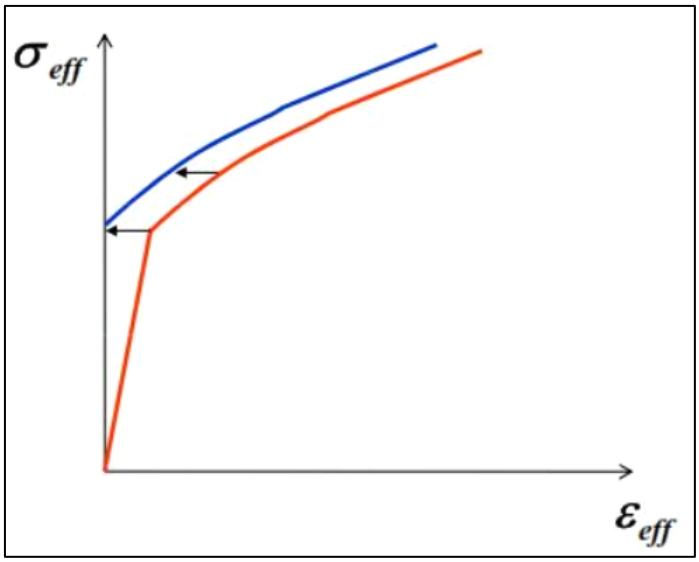
LS-DYNA çözümlerinde malzeme modeli olarak MAT24 (Parçalı lineer plastik, Piecewise Linear Plasticity) kartı kullanılmıştır. Bu malzeme modeli, parçalı doğrusal plastik olarak malzeme davranış özelliği sayesinde malzemenin elastik sınırdan sonra doğrusal olmayan plastik bölgedeki davranışını farklı eğimlerle temsil edebilmektedir. Böylece, tek bir doğrusal sertleşme eğrisi yerine, her bir gerinim aralığında farklı bir eğim tanımlanarak malzemenin gerçek plastik bölge davranışının daha doğru şekilde modellenmektedir.

Bu çalışmada, PLA malzemesinin plastik bölgedeki davranışını temsil etmek amacıyla, kopma gerilimi ile kırılma gerilimine arasında kalan bölgedeki deneysel veriler kullanarak gerçek gerilme-gerinim eğrisi oluşturulmuştur. MAT 24 kartı, elastik bölge davranışını Hooke yasasına göre tanımlar. Elastik bölge davranışında gerilme ve gerinim arasındaki ilişki elastik modülü ve Poisson oranı parametrelerine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, malzeme eğrisinin kopma geriliminden itibaren tanımlanmasıdır. Çünkü LS-DYNA çözümlerinde, elastik bölgeye kadar olan davranış E ve υ değerleri üzerinden hesaplanırken, kopma gerilmesinden sonraki plastik bölge tanımlanan gerçek gerilme-gerinim eğrisi aracılığıyla hesaplanmaktadır. Bu nedenle, deneysel verilerden elde edilen mühendislik gerilme-gerinim değeri, Eş. 6.5 ve Eş. 6.6 kullanılarak LS-DYNA çözüme uygun hale dönüştürülmüştür. LS-DYNA gerilim- gerinim eğrisinin tanımı Şekil 6.13'te verilmiştir.

$$\sigma_{eff} = \sigma_{true} \tag{6.5}$$

$$\varepsilon_{eff} = \sigma_{true} - \left(\frac{\sigma_{true}}{E}\right) \tag{6.6}$$

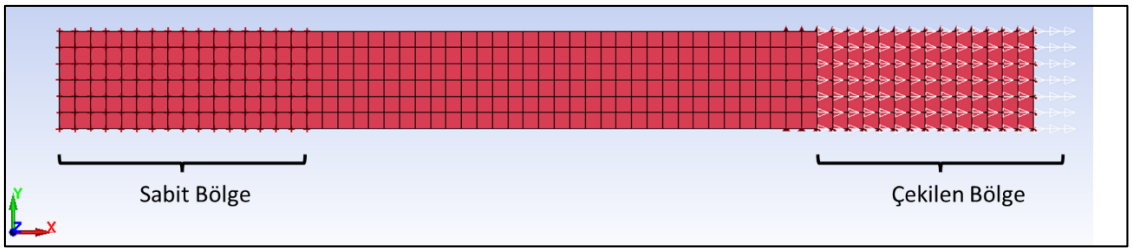


Şekil 6.13. LS-DYNA etkin gerilim eğrisinin açıklanması

6.3.1. Çekme testi

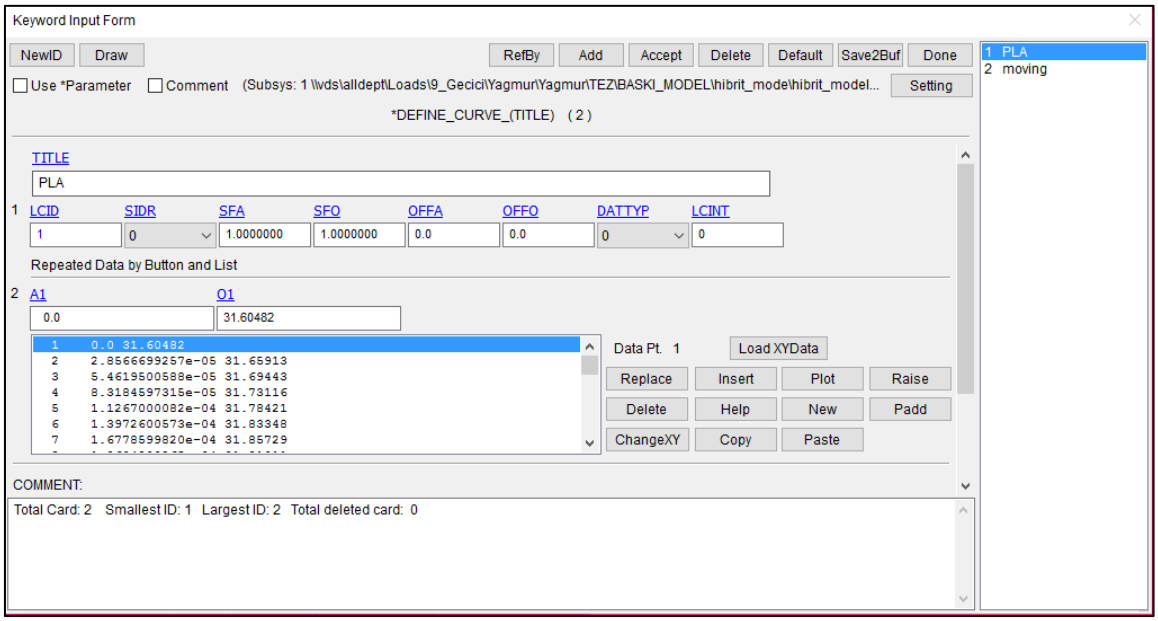
Deneysel çekme testlerinin doğrulanabilmesi amacıyla, çekme testi numunesinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. 250x25x3mm boyutlarında bir çekme modeli hazırlanmıştır. Numunesinin uç kısımlarına deneylerde olduğu gibi FR24 destek levhası eklendiği ve çene ile sabitlenen bölgeler sabit bağlantı bölgesi olarak tanımlanmıştır. Böylece yüklemenin uygulanacağı serbest bölge deneysel testtekiyle aynı olarak 117x25x3mm olarak modellenmiştir.

Model 894 adet kare (quad) elemandan oluşturulmuştur. Numunenin sol ucu, deneysel koşullara uygun olarak tamamen sabitlenmiştir. Sağ uçta yer alan 65,55 mm uzunluğundaki bölge ise X ekseni yönünde çekme hareketine izin verilmiştir. Bu bölge, deneysel testte uygulanan hızla aynı olacak şekilde 2mm/dk hızında yer değiştirme kontrolü altında hareket ettirilmiştir. Hazırlanan sonlu elemanlar modelinin genel görünümü Şekil 6.14'te verilmiştir.

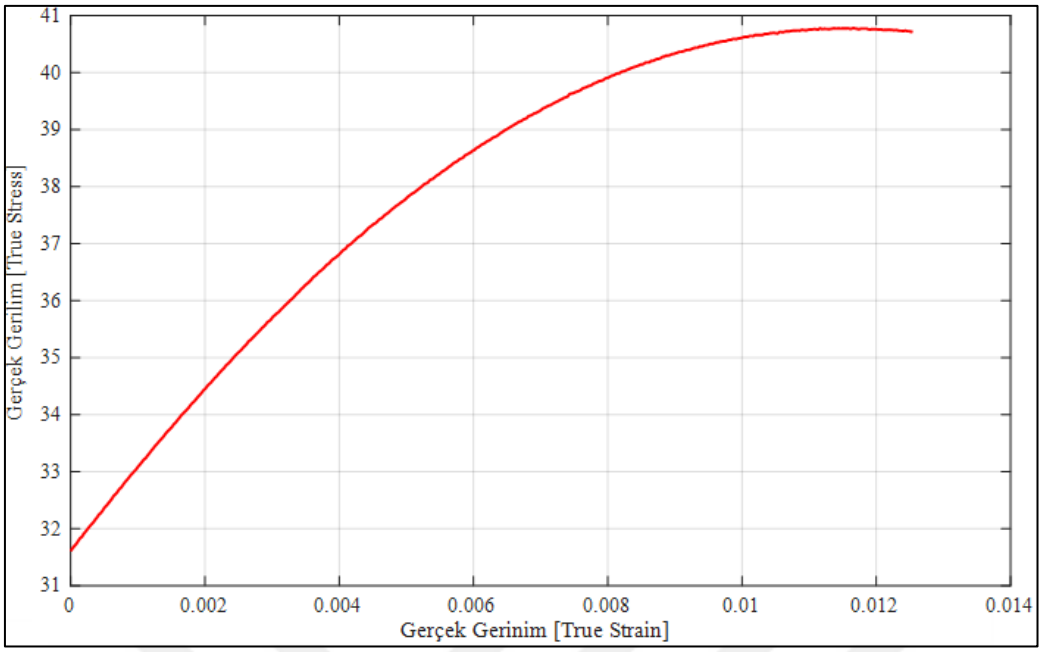


Şekil 6.14. Çekme testi numunesi sonlu elemanlar modeli ve başlangıç-sınır koşulları

LS-DYNA çözüm adımları izlenerek malzeme modeli tanımlanması yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim eğrilerine göre, numunelerin yaklaşık 31,60 MPa gerilme değerinde kopma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu değere göre, Eş. 6.5 ve Eş. 6.6 kullanılarak MAT 24 malzeme modeli için gerekli olan, kopma gerilmesinden başlayan ve malzemenin plastik bölge davranışını temsil eden eğri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu gerçek gerilme-gerinim eğrisi, LS-DYNA ortamında DEFINE_CURVE kartı kullanılarak tanımlanmıştır. DEFINE_CURVE kartı Şekil 6.15'te plastik geçiş bölgesini temsil eden gerilme-gerinim eğrisi Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.15. PLA malzemesi davranış eğrisi (DEFINE_CURVE Kartı)



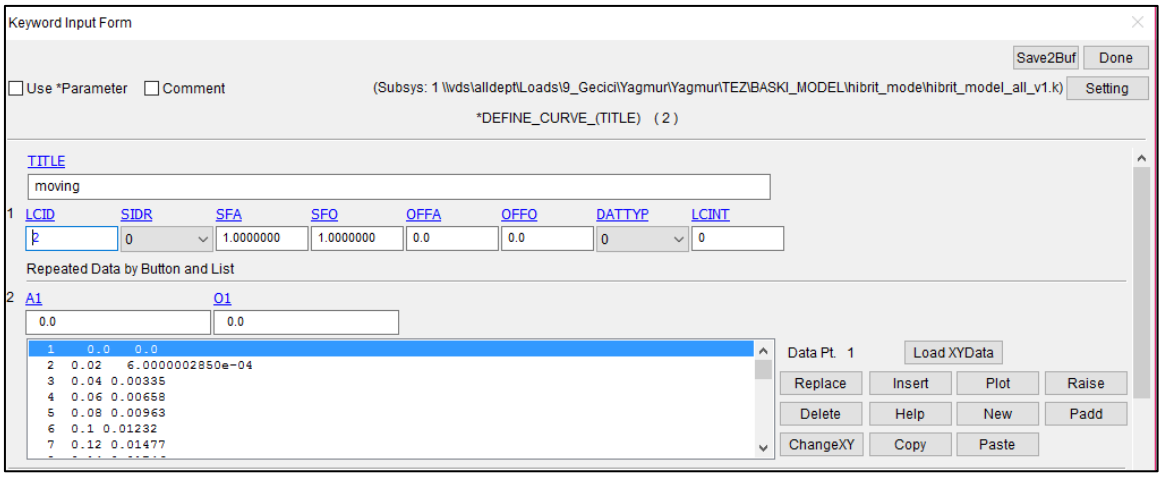
Şekil 6.16. PLA malzemesi LS-DYNA için oluşturulan gerçek gerilim-gerinim eğrisi

Elde edilen malzeme davranış karakteristiği LS-DYNA ortamında kullanılan MAT_24 kartı tanımına eklenmiştir. Çizelge 6.3'te verilen MAT_24 kartı değerleri verilmiştir. Malzemenin plastik bölge davranışı Şekil 6.17'de eğrisi kullanılmıştır.

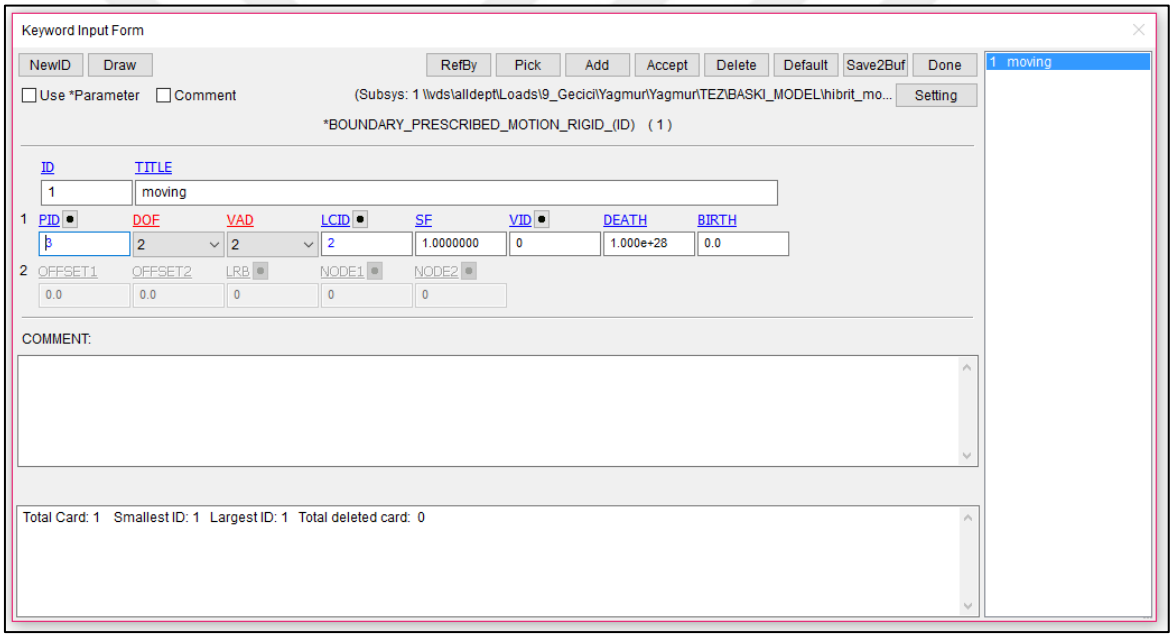
Çizelge 6.3. LS-DYNA MAT_24 Malzeme Kartı Değerleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Yoğunluk	ρ	1260,00	kg/m^3
Elastisite Modülü	E	3000,00	MPa
Poisson Oranı	υ	0,33	-
Akma Gerilmesi	σ_{akma}	31,60	MPa
Malzeme Modeli	MAT_24	-	Parçalı Lineer Plastik

Çekme testleri yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirildiğinden, LS-DYNA analizlerinde de aynı koşul sağlanmıştır. Bu amaçla, DEFINE_CURVE kartı kullanılarak, çekme testinde uygulanan yükleme eğrisine karşılık gelen yer değiştirme kontrollü eğri oluşturulmuştur. Tanımlanan bu eğri, BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID kartı ile modele uygulanmıştır. Kullanılan kartlar ve parametreler Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17. LS-DYNA yükleme eğrisi



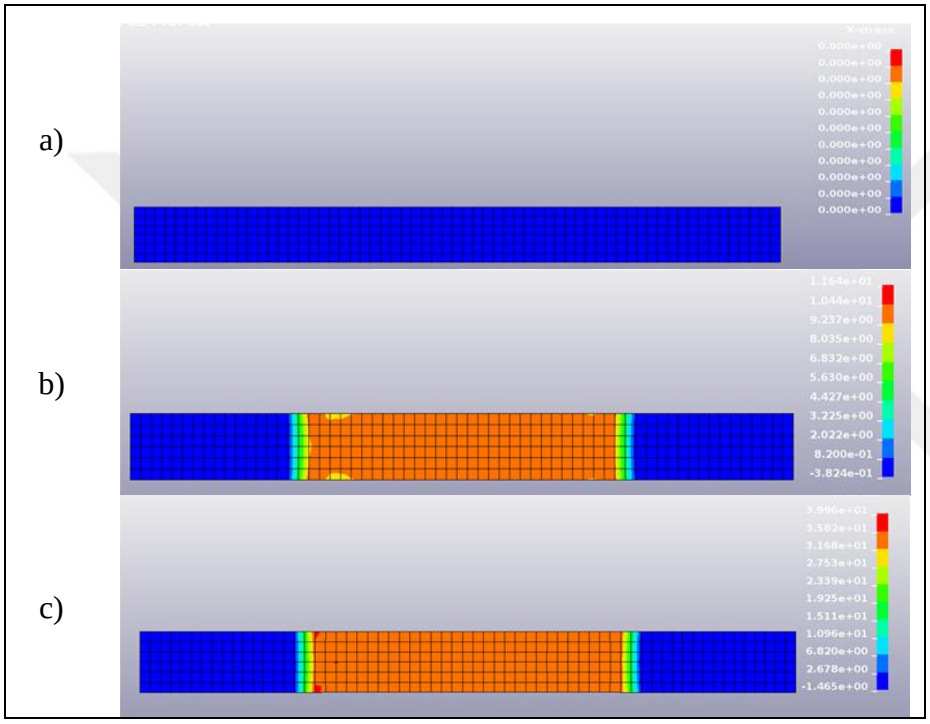
Şekil 6.18. LS-DYNA hareket kartı örneği

Şekil 6.18'de verilen yükleme eğrisinin temsili olarak seçilen noktalar ait zaman ve yer değiştirme verileri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Temel malzeme kartı ile sınır ve başlangıç koşulları tanımlanan çekme testi numunesi, implicit çözüm yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, dört düğüm elemanları üzerinden gerilme ve gerinim değerleri hesaplanmıştır. Analiz boyunca, numunenin başlangıç-elastik bölge ve kopma bölgesi için gerilim dağılımı Şekil 6.19'da verilmiştir.

Çizelge 6.4. DEFINE_CURVE için seçilmiş hareket eğrisinin temsil edici noktaları

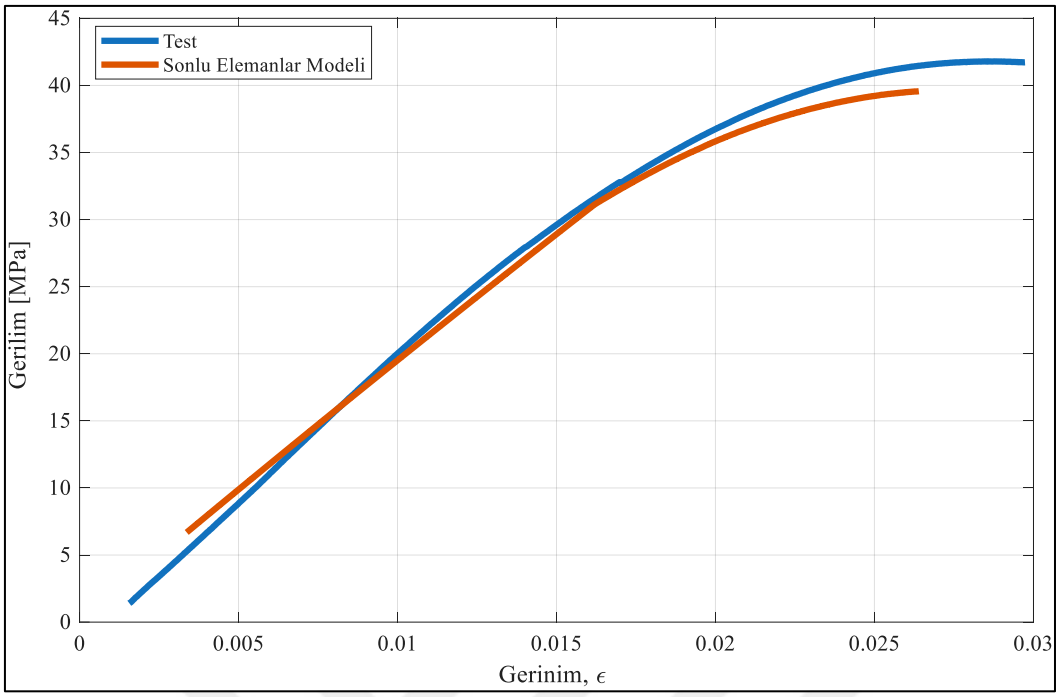
Nokta	Zaman (s)	Yer değiştirme (mm)
Başlangıç	0,00	0,00
Başlangıç sonrası bölge	10,00	1,25
Orta nokta	33.24	4,15
Son nokta	66,51	8,31



Şekil 6.19. Çekme testi sırasında numunenin farklı yükleme adımlarındaki eksenel gerilme dağılımı: a) Yükleme öncesi, b) Elastik bölge sonu – boyun verme başlangıcı, c) Plastik deformasyonun ilerlediği son durum

Elde edilen sayısal veriler, deneysel çekme testlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. LS-DYNA ortamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar modeli analizi, gerçek gerilim ve gerinim değerlerini vermektedir. Bu nedenle, Eş. 6.3 ve Eş. 6.4 tersinir şekilde hesaplanarak mühendislik gerilim ve gerinimleri hesaplanmıştır. Hesaplanan mühendislik gerilim-gerinim değerleri, deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.20'de verilmiştir. Şekil 6.20'de görüldüğü üzere, LS-DYNA analizinde kullanılan malzeme parametreleri, çekme testleri sonuçlarıyla uyumlu bir davranış göstermiştir.

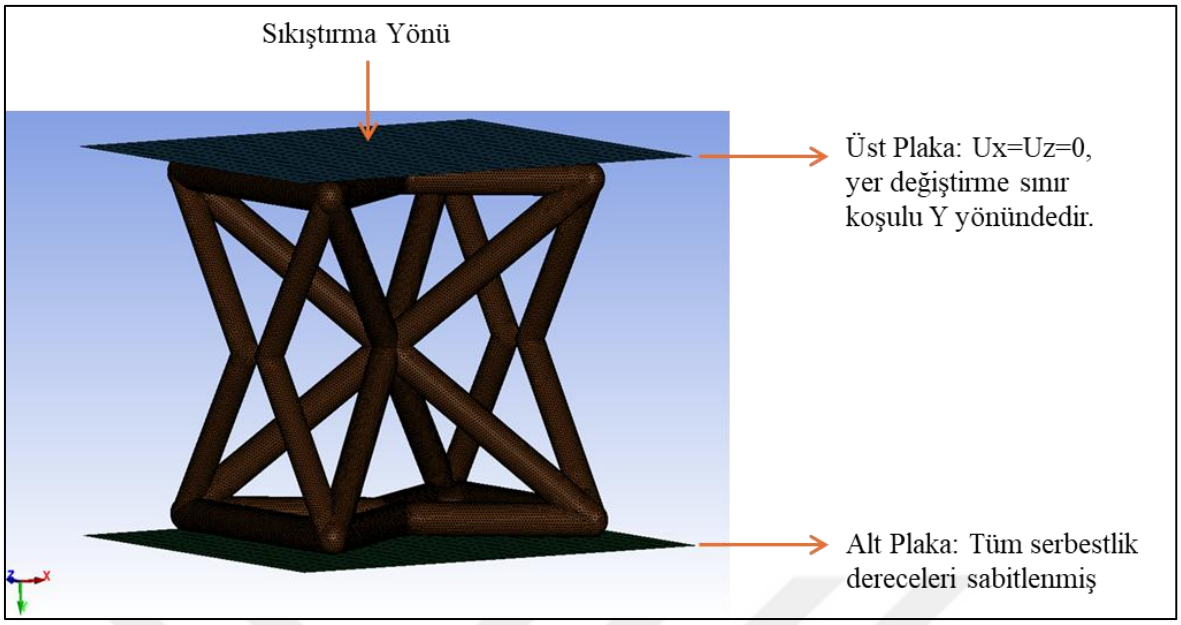


Şekil 6.20. Hibrit yapı sonlu elemanlar analizi ve test karşılaştırma eğrisi

6.3.2. Basma testi

Basma testlerinin sayısal olarak doğrulanabilmesi amacıyla, 100x100x100 mm boyutlarında PLA malzemeden birim hibrit kafes yapısının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli için HYPERMESH yazılımı kullanılmıştır. Modellemede yüzeyleri için ilk olarak 0.7 mm eleman boyutuna sahip iki boyutlu yüzey ağı (surface mesh) örülmüştür. Ağ kalitesi, belirlenen hata kriterine (jacobian: 0,4, tet collapse: 0,1 ve en/boy oranı: 5–10) göre kontrol edilerek hatalı elemanlar düzeltilmiş ve yüzey ağı optimize edilmiştir. Örülen iki boyutlu ağ yardımıyla yapının iç hacmi katı ağ yapısı (solid mesh) ile doldurulmuştur. Katı ağ için dört yüzlü eleman ağı (tetramesh) kullanılmıştır. Nihai olarak model, 761233 adet katı elemandan meydana gelmektedir.

Gerçek basma testi koşullarını sayısal olarak doğru biçimde yansıtabilmek amacıyla, hibrit yapının üst ve alt yüzeylerine çelik plakalar eklenmiştir. Bu plaklar, hibrit yapıdan 2.21mm mesafe bırakılarak konumlandırılmıştır. Plakaların her biri 3 mm kalınlığında modellenmiştir. Çelik plakalar dört düğüm (quad) yüzey elemanları ile modellenmiş ve toplamda 1250 elemandan oluşmaktadır. Hibrit yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 6.21‘de verilmiştir.

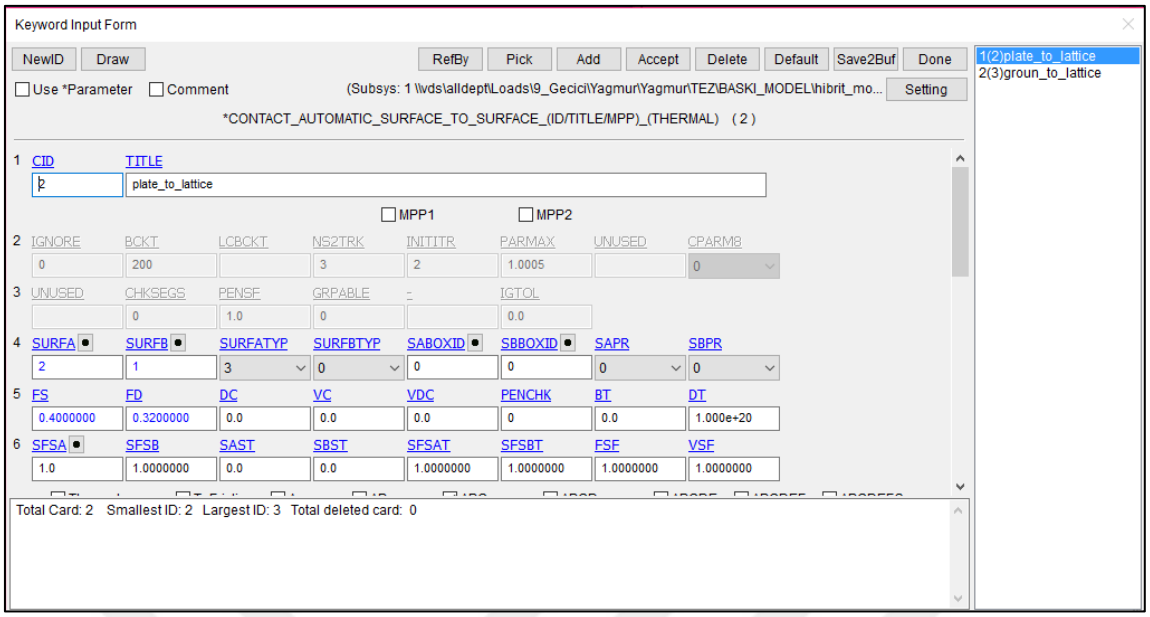


Şekil 6.21. Hibrit birim kafes yapısı sonlu elemanlar modeli

Şekil 6.21'te gösterilen mavi yüzey, hareketli yüzey olup basma testinde uygulana yer değişmesi miktarıyla aynı eğri oluşturularak Y yönünde aşağı doğru hareket ettirilmiştir. Yeşil yüzey ise test düzeneğindeki sabit alt plakayı temsil etmekte olup, altı yönde tamamen kısıtlanmış ve ankastre olarak modellenmiştir.

Malzeme modeli olarak, çekmek testleriyle doğrulanan MAT_24 kartı kullanılmıştır. Bu sayede malzeme davranışı hem deneysel verilerle hem de sonlu elemanlar analizleriyle doğrulanmış ve modele güvenilir biçimde aktarılmıştır.

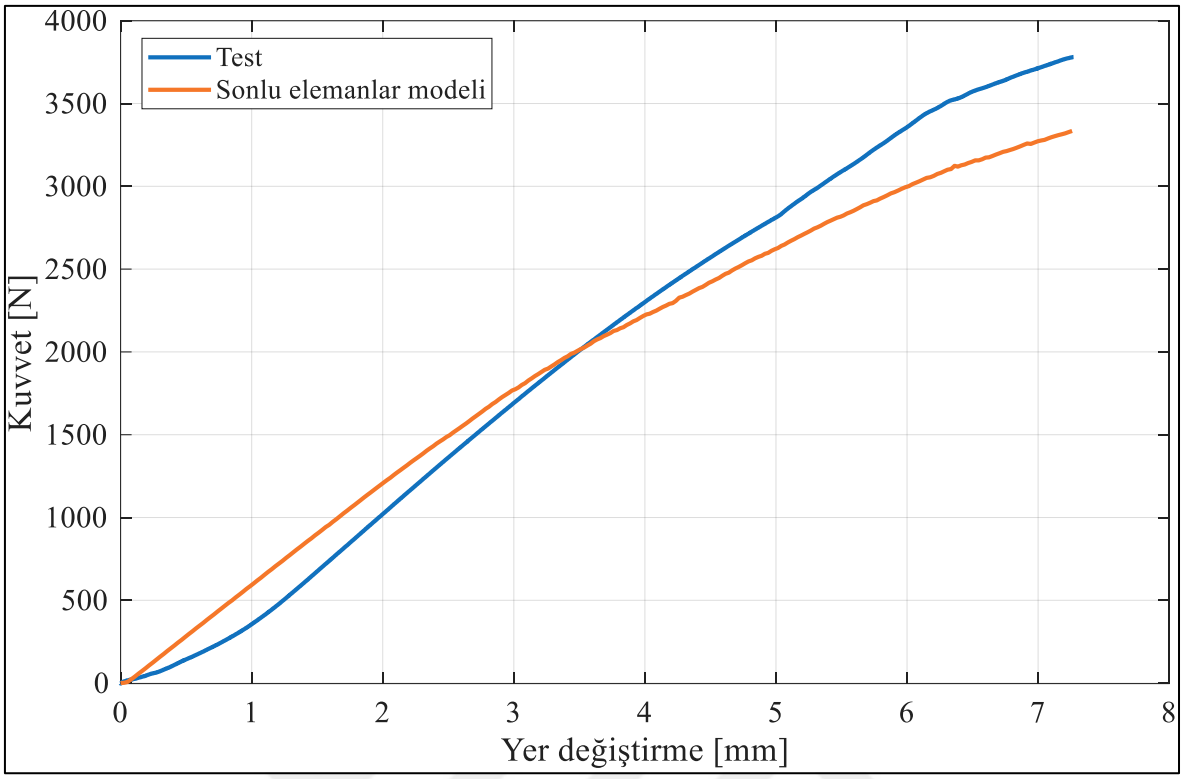
Yapı sıkıştırma sürecine girdikçe, üst ve alt plaklar ile hibrit yapı arasındaki etkileşimlerin doğru biçimde modellenmesi gerekmektedir. Modelde üst plaka- kafes yapısı ve kafes yapısı- alt plaka ve hibrit yapısındaki elemanların kendileri arasında birbirleri ile konuşması gerekmektedir. LS-DYNA analizlerinde bu etkileşimi sağlamak amacıyla AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE ve AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID kartları kullanılmıştır. AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE kartı temas yüzeyleri arasındaki kuvvet aktarımını ve ayrılma davranışını tanımlayarak analiz sırasında gerçekçi etkileşimi sağlamaktadır. Kartın LS-DYNA ortamındaki tanımı Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.22. LS-DYNA etkileşim (CONTACT) kartı tanımlaması

Şekil 6.22'de verilen CONTACT tanımına göre, yumuşak yüzey olan SURFA kafes yapıyı, sert yüzey olan SURFB ise üst ve alt çelik plakayı temsil etmektedir. CONTACT kartındaki bir diğer önemli parametre, yüzeyler arasındaki sürtünme katsayılarıdır. Bu çalışmadan yapılan kuvvet okuma sonuçlarına göre en dengeli statik sürtünme katsayısı 0,4 dinamik sürtünme katsayısı 0,32 olarak belirlenmiştir.

Tüm sistem kart tanımlamaları tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar modeli ile deneysel testlerin uyumunu değerlendirmek amacıyla, çekme testlerinden farklı olarak kafes yapının taşıdığı yükler esas alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kuvvetleri okumak için RCFORC kartı kullanılarak üst çelik plaka ile kafes yapısı arasındaki reaksiyon kuvvetleri okunmuştur. Analiz sürecinde, her bir sıkıştırma adımında çelik plaka ile yapı arasındaki reaksiyon kuvveti kaydedilmiştir. Çelik plaka ile kafes yapı arasında temasın başlamasıyla birlikte oluşan reaksiyon kuvvetleri Şekil 6.23'te verilmiştir. Şekil 6.23'te deneysel verilen ile elde edilen reaksiyon kuvvetiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.23. Reaksiyon kuvveti karşılaştırılması

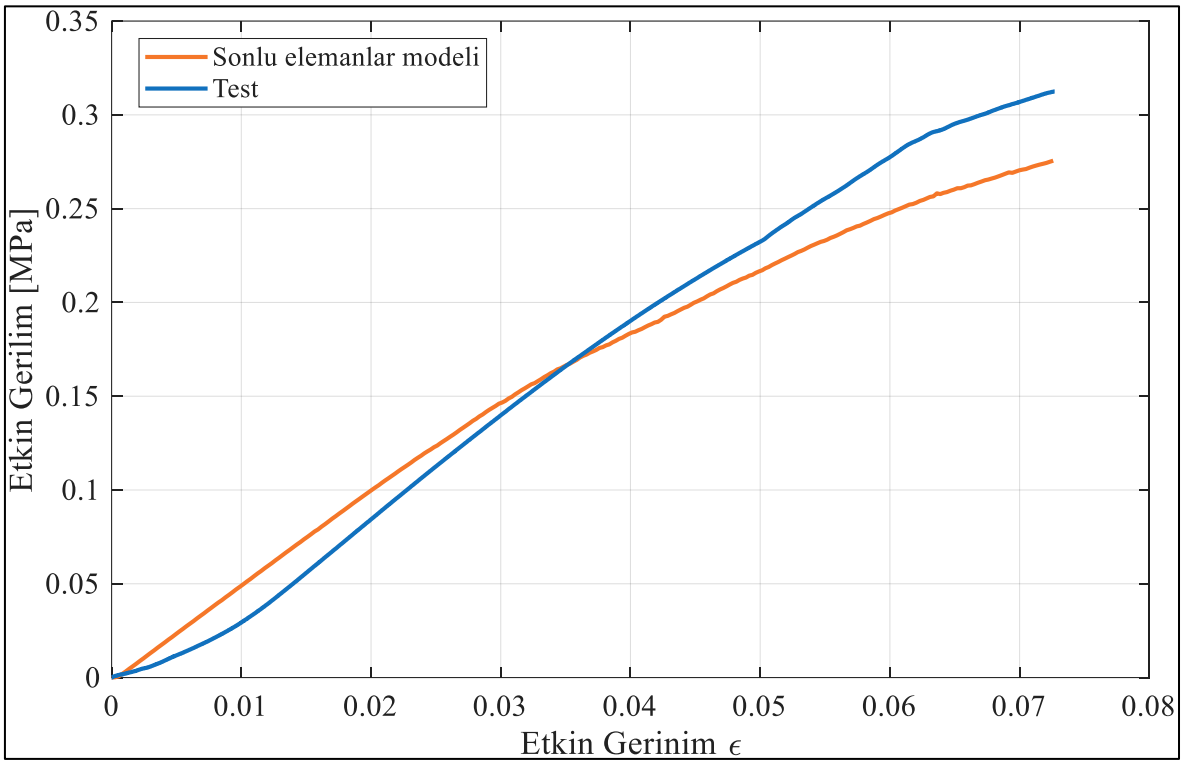
Şekil 6.23'te görüldüğü gibi sayısal analizler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, deneysel basma testlerinden elde edile sonuçlarla benzer eğilimde olduğu gösterilmiştir. Elde edilen bu doğrulama, hibrit kafes yapının yük taşıma kapasitesinin ve deformasyon davranışının LS-DYNA ortamında başarılı biçimde yansıttığı görülmüştür. Bu doğrulama sonucunda, hibrit kafes yapısının gerçek davranışını temsil eden sayısal model güvenli hale getirilmiştir. Geometrik ölçeklendirme çalışmasına geçmeden önce, hibrit kafes yapısının etkin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Basma testleri ve analizlerinden elde edilen kuvvet- yer değiştirme verileri kullanılarak hibrit kafes yapısının etkin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Etkin gerilim (σ_{etkin}) ve etkin gerinim (ε_{etkin}) değeri hesapları için Eş. 6.7 ve Eş. 6.8 kullanılmıştır.

$$\sigma_{etkin} = \frac{F(s)}{A_0} \tag{6.7}$$

$$\varepsilon_{etkin} = \frac{\Delta h(s)}{h_0} \tag{6.8}$$

Burada, A_0 hibrit yapının yükleme yönündeki başlangıç kesit alanıdır ve hibrit yapı için 12100 mm^2 'dir. h_0, başlangıç yüksekliği (mm) ve $\Delta h(s)$ yükleme süresince meydana gelen yer değiştirmenin değişimidir. Oluşturulan eğrilerin etkin elastik modülü (E^*), yükleme yönüne dik yöndeki yer değiştirmesinden ise Poisson oranı hesaplanmıştır. Deney ve sonlu elemanlar analizinin etkin gerilim- gerinim karşılaştırılması Şekil 6.24'te verilmiştir.

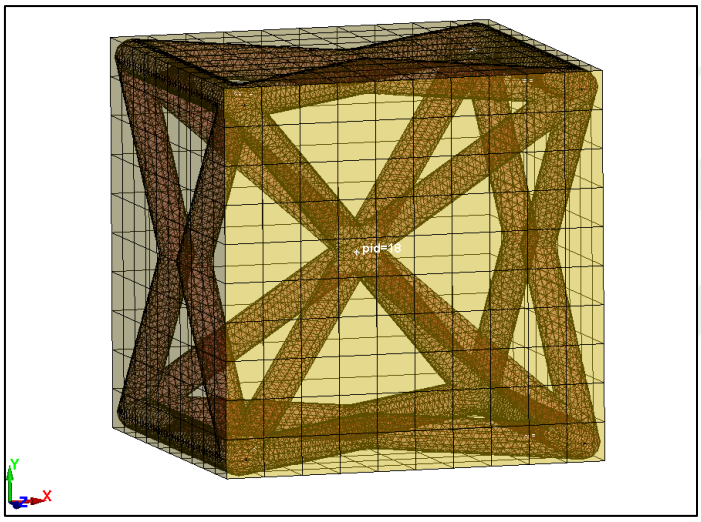


Şekil 6.24. Etkin gerilim- gerinim eğrilerinin karşılaştırılması

Hibrit yapılarının genel mekanik özellikleri yaygın biçimde kullanılan Gibson-Ashby modeli kullanılır. Fakat Gibson-Ashby modeline göre bağıl yoğunluk ile elastisite modülü arasında bağlantısı, geometri ve deneye bağlı kat sayılar ile çarpımı ile ilişkilidir. Bu ilişki Eş. 3.2'de verilmiştir. Bu nedenden dolayı öncelikli olarak hibrit yapının bağıl yoğunluğu hesaplanmıştır. Bağıl yoğunluk, yapının hacimsel olarak ne kadar katı malzeme içerdiğini anlatan temel geometrik parametredir. Bağıl yoğunluk, gözenekli veya kafes yapının yoğunluğunu (ρ^*) aynı malzemenin tam yoğunluğuna oranı olarak hesaplanır ve aşağıdaki Eş. 6.9 ile ifade edilir:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\mathrm{V_{kafes}}}{\mathrm{V_{toplam}}} \tag{6.9}$$

Burada, V_{kafes} yapıyı oluşturan katı malzemenin toplam hacmini, V_{toplam} ise kafes yapısının dış sınırlarıyla çevrelenen toplam hacmi ifade etmektedir. Birim hibrit kafes yapısı LS-DYNA üzerinden toplam hacim olanı ve kafes yapısının kapladığı toplam hacim hesaplanmıştır. Dış sınırlarının belirlenmesi için kafes yapısının dışına kafes yapısını kapsayacak kübik ile kapatılmıştır. Hacim hesaplamaları Şekil 6.25'te verilmiştir. Hesaplanan değerlere göre hibrit yapının bağıl yoğunluğu 0,108 olarak hesaplanmıştır. Bu değer aynı zamanda hibrit kafes yapısının yüksek gözenekliliğine sahip olduğunu ve dolaysıyla düşük yoğunluklu, hafif bir yapı karakteri sergilediğini göstermektedir.



Şekil 6.25. Birim hibrit kafes yapısının hacimsel görünümü

Gibson-Ashby modeli, metal köpükler veya ideal homojen yapılar için geliştirilmiş teorik bir hesaplamadır. Bu modelde deformasyon davranışlarına göre farklı katsayı değerdeki kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında tasarlanan birim hibrit kafes yapısı eğilme baskın olup, bağıl yoğunluğu 0,108'dir. Bu değerlere göre, Şekil 6.24'te verilen analitik ve deneysel verilerin teorik değerlerle karşılaştırılması için Eş. 6.10'dan yararlanılmıştır.

$$\sigma^* = C_\sigma \sigma_s (\frac{\rho^*}{\rho_s})^{n_2} \quad (6.10)$$

Eş. 6.10'da n_2 katsayısı eğilme baskın yapılar için yaklaşık 1,5 seçilmektedir. C_σ gerilme faktörü ise geometri, topoloji ve baskı kusurlarına bağlı olarak yaklaşık 0,25-0,40 arasında

değer almaktadır (Y. Li ve diğerleri, 2024) . Bu tez çalışmasında yapıya bağlı olarak n_2 kat sayısı 1,5 C_σ ise 0,25 olarak alınmıştır. Birim hibrit kafes yapısının etkin gerilme değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$\sigma^* = 0{,}25 * (31{,}6) * (0{,}108)^{1{,}5}$$
$$\sigma^* = 0{,}28\, MPa \quad (6.11)$$

Şekil 6.26'daki sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara göre birim hibrit kafes yapısı 0,275 MPa, deneysel sonuçlar ise 0,31 MPa olarak bulunmuştur. Gibson-Ashby teorik modeli 0,28 MPa olarak hesaplanmıştır. Deneysel, teorik ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 6.24'ye göre, lineer bölge için kafes yapısının etkin elastik modülü hesaplanmasında Eş. 6.12'den yararlanılmıştır.

$$E^* = \frac{\sigma_{etkin}}{\varepsilon_{etkin}} \quad (6.12)$$

Şekil 6.28'de lineer bölgede, 0,01 birim şekil değiştirme (gerinim) için 0,05 MPa etkin gerilime elde edilmiştir. Bu verilere göre, Eş. 6.12 yardımıyla kafes yapısının elastik modülü (E^*) 5 MPa olarak hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında, elde edilen elastik modülü değeri kullanılarak Gibson-Asby modeli kapsamında C_1 kat sayısı kalibre edilmiştir.

$$C_1 = \frac{E^*/E_s}{(\rho^*/\rho_s)^{n_1}} \quad (6.13)$$

Eş. 6.13'e göre n_1 kat sayısı eğilme baskın yapıları için yaklaşık 2 olarak alınmıştır. PLA malzemesinin elastik modülü 3000 MPa, kafes yapısının elastik modülü 5 MPa olarak ve bağıl yoğunluğa 0,108 olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler ile yapılan hesaplama sonucunda birim hibrit kafes yapısı için C_1 değeri yaklaşık 0,175 olarak hesaplanmıştır.

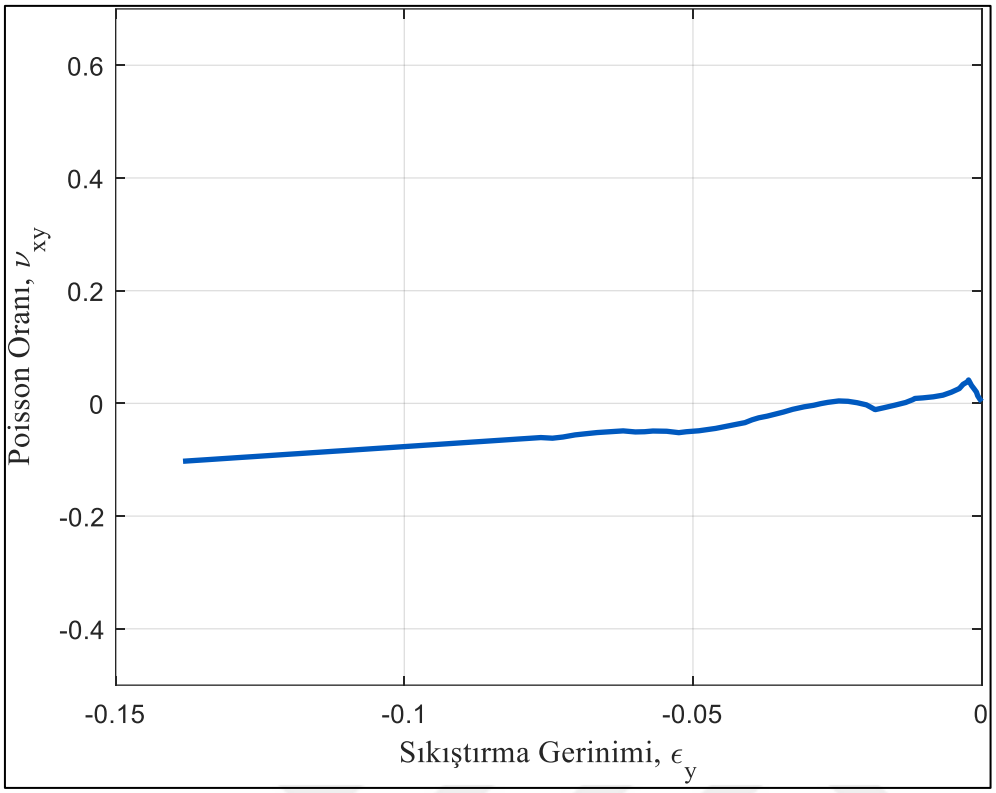
C_1 değeri, geometri ve üretime koşullarına bağlı bir katsayıdır. Bu değerin düşük çıkması eklemeli imalat süreçlerinin yol açtığı düğüm esnekliği, boyutsal sapmaları ve üretim kusurları etkisiyle Gibson-Ashby öngörüsünden saptığını ortaya koymaktadır. Bu durum eğilme baskın deformasyon davranışı, düğüm noktaları dönme etkisi ve üretim kaynaklı anizotropi etkenlerle uyum içerisindedir.

Anizotropik davranışın tespit edilmesi için birim hibrit kafes yapısının Poisson oranı hesaplanmıştır. Poisson oranı bir yapının çekme veya basma kuvveti altında enine daralması veya genişlemesini ifade etmektedir ve Eş. 6.14'te ifade edilir.

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_{enine}}{\varepsilon_{boyuna}} \tag{6.14}$$

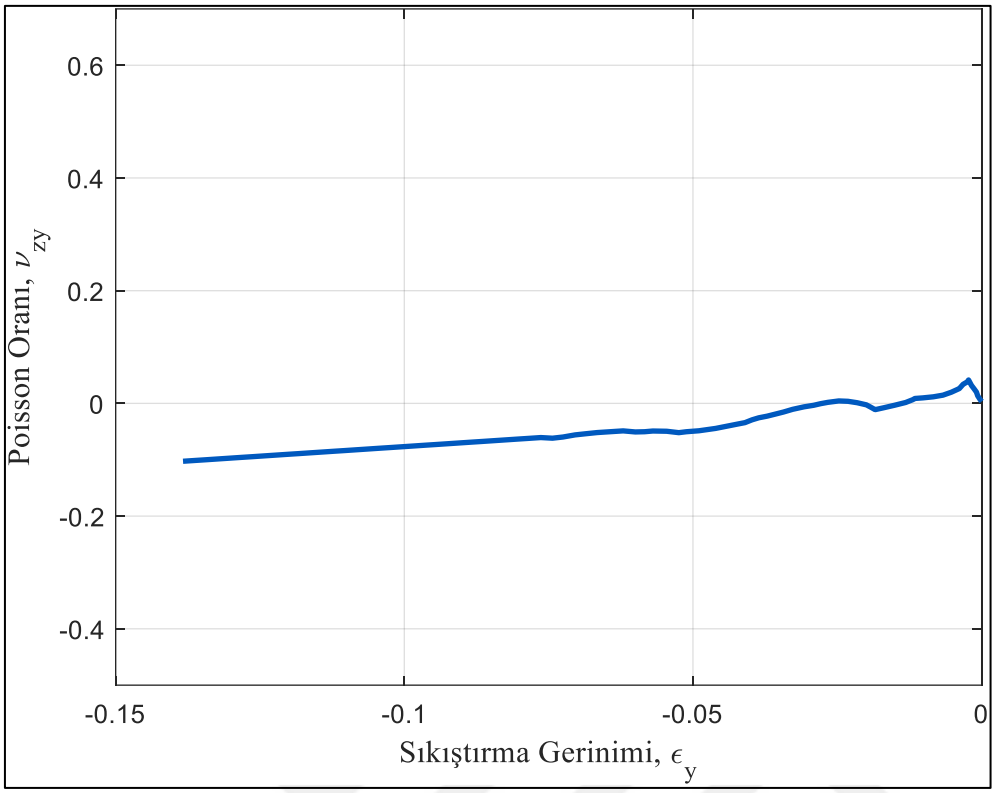
Eş. 6.14'te belirtilen ε_{enine} yapının yükleme altında yanal yöndeki şekil değiştirmesini ifade ederken, ε_{boyuna} yükleme yönündeki şekil değişimini ifade etmektedir. Bu çalışma için yükleme yönü Y yönü olmaktadır. Yapıda anizotropik etkinin görülmesi için υ_{xy} ve υ_{zy} değerleri hesaplanmıştır.

X yönündeki şekil değişimi için birim hibrit yapının sıkıştırma etkisi boyunca X yönündeki boyundaki değişim hesaplanmıştır. Bu değişim için Eş. 6.8'den yararlanılmıştır. Yükleme boyunca hesaplanan Poisson oranı Şekil 6.26'da verilmiştir.



Şekil 6.26. Düşey sıkıştırma boyunca yapıda elde edilen Poisson oranının υ_{xy}, düşey gerinim ε_y ile değişimi

Şekil 6.26'da görüldüğü gibi başlangıçta yapı pozitif Poisson oranın sahip olurken yükleme ilerledikçe öksetik davranış sergilemiştir. Hesaplanan Poisson değerinin öksetik özelliğini gösterirken öksetik özellik gösteren kafes yapıları içerisinde Poisson oranı olarak alt sınırlarda yer almaktadır. Bu durum yapının yükleme arttıkça hibrit geometri yapısının sebep olduğu öksetik hücrenin tam açılma/kapanma mekanizmasının etkin olamaması ve kirş yapıların burkulma yönelimine geçmesidir. Aynı değerlendir Z yönü için yapılmıştır. υ_{zy} Poisson değişimi Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.27. Düşey sıkıştırma boyunca yapıda elde edilen Poisson oranının υ_{zy}, düşey gerinim ε_y ile değişimi

Şekil 6.27'de görüldüğü gibi y yükleme yönünde basma yükü arttıkça yapının υ_{zy} Poisson değeri -0,09'dan -0,12 değerlerine düştüğü görüşmüştür. Bu durum yapının öksetik karakteristiğinin basma arttıkça ilerlediğini göstermiştir. Elde edilen değerlerin ise bükülme baskın karakteristik sağlayan öksetik yapılar için zayıf-orta öksetik yapılar sınıfına girmiştir.

6.3.3. Ölçeklendirilmiş kafes yapısı

Tez çalışmasında, deneysel veriler kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarındaki birim hibrit yapı doğrulanmıştır. Doğrulaması yapılan bu modelin boyutları değiştirilmeden hibrit kafes sistemi tasarlamak amacıyla, kafes sistemindeki birim hücrenin mekanik özellikleri değerlendirmiştir.

Bu boyutlandırma tamamen geometrik benzerlik esasına göre yapılmıştır. 100x100x100mm boyutlarındaki birim hibrit yapının 1/3 oranında küçültülerek yeniden modellenmiştir. Küçültülen bu model, hibrit kafes sisteminde yer alan tek bir birim elemanı temsil

etmektedir. Geometrik olarak benzer olan bu yapıların, birim hücre düzeyinde aynı mekanik davranışı sergilemesi beklenmektedir.

Geometrik benzerlik esasına göre iki yapı arasındaki ilişki Eş. 6.15'teki gibi olmalıdır:

$$\frac{L_2}{L_1} = \lambda \tag{6.15}$$

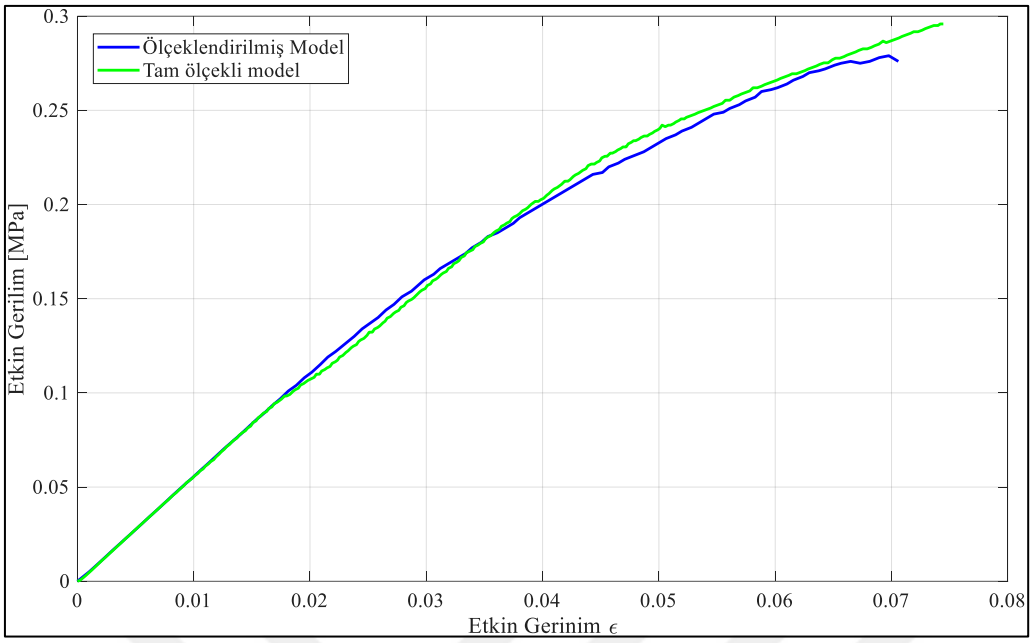
L_2 ölçeklendirilmiş yapının uzunluğunu, L_1 ise tam boyutlu yapının uzunluğunu ifade etmektedir. Ölçeklendirilirmiş yapı ile tam boyutlu yapının hacim ve alanı arasındaki bağlantı ise Eş. 6.16 ve Eş. 6.17'de verilmiştir.

$$A_2 = A_1 * \lambda^2 \tag{6.16}$$

$$V_2 = V_1 * \lambda^3 \tag{6.17}$$

Eş. 6.16'de gösterilen A_1 ve A_2 sırasıyla birinci ve ikinci yapının alanını ifade etmektedir. Eş. 6.17' de V_1 ve V_2 sırasıyla birinci ve ikinci yapının hacmini ifade ederken, her iki denklemdeki λ sabit kat sayına göre oranlanmaktadır. Bu durum geometrik boyutlandırma sabit katsayı ile korunmuş olduğunu ifade eder ve bu sebeple iki yapı arasında bir bağıl yoğunluk farklı oluşmaz ve hibrit yapı aynı mekanik özellikleri gösterir.

Tam boyut ve ölçeklendirilmiş hibrit yapısı için gerilme-gerinim değerleri Şekil 6.28'de verilmiştir. Şekil 6.28'de görüldüğü gibi yapının etkin gerilim ve etkin gerinim değerleri tam boyutlu yapının değerleri ile aynıdır.

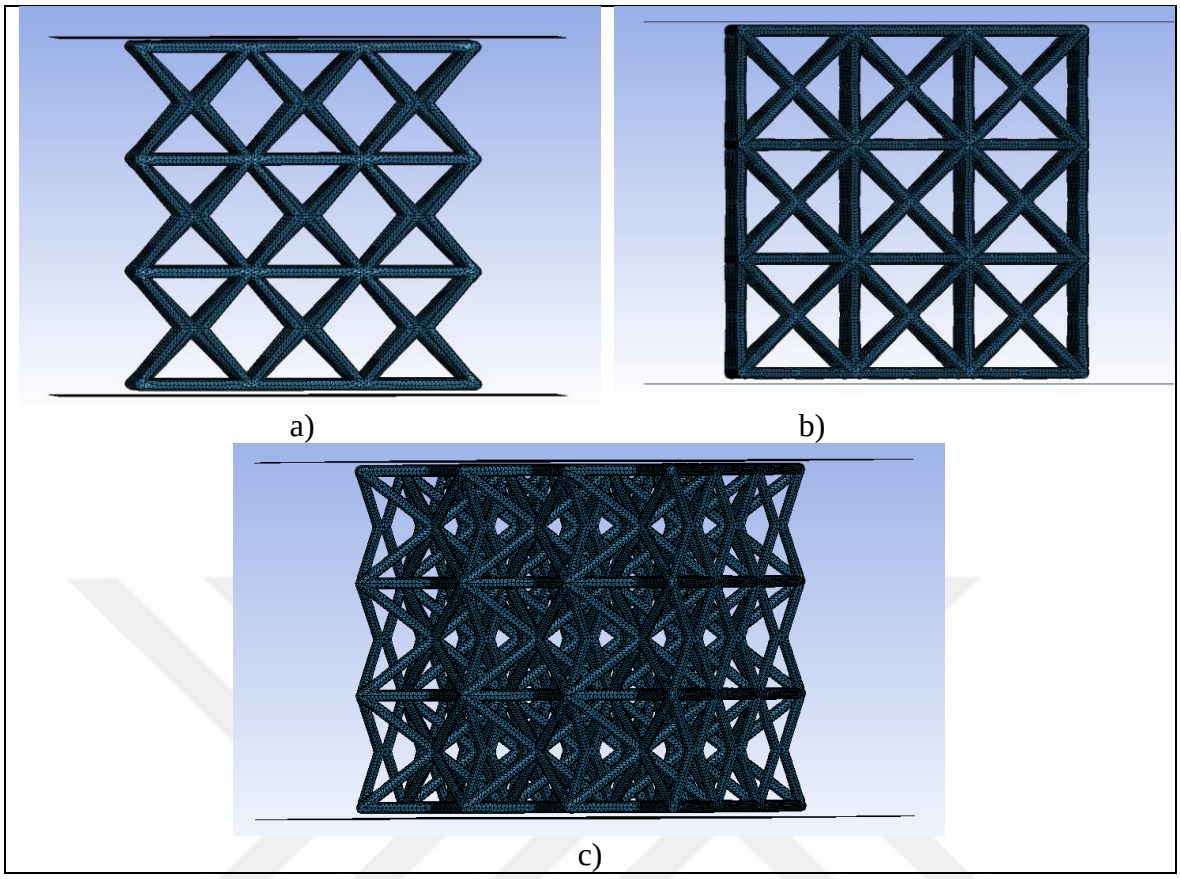


Şekil 6.28. Ölçeklendirilmiş model ile tam ölçekli model Etkin gerinim-gerilim karşılaştırılması

Şekil 6.28'de görüldüğü gibi tam ölçekli model ile 1/3 oranında küçültülmüş hibrit modelin etkin gerilim-gerinim eğrilerinin lineer bölgede neredeyse çakıştığı ve plastik bölgeye geçildiğinde benzer davranış sergilediği görülmüştür. Bu durum, geometrik benzerliğin korunmasıyla birlikte bağıl yoğunluk değerinin eşit tutulmasının, ölçek değişimine rağmen yapının mekanik özelliklerini koruduğunu göstermiştir.

6.4. Hibrit Kafes Sistemi

Tez çalışmasının daha önceki bölümlerin birim hibrit kafes yapısın sayısal ve deneysel çalışmaları yapılarak sonlu elemanlar modeli doğrulanmış ve mekanik davranışı analiz edilmiştir. Söz konusu birim yapıdan yola çıkarak bu bölümde ise doğrulanmış modelin x, y ve z yönlerinde 3 kez tekrarlanması ile oluşturulan hibrit kafes sistemi oluşturulmuştur. Hibrit kafes sisteminin makro ölçekte enerji sönümleme kapasitesi, sertlik dağılımını, mekanik özellikleri ve deformasyon karakteri araştırılmıştır. Düzenli kafes yapısının sonlu elemanlar modeli Şekil 6.29'da verilmiştir.



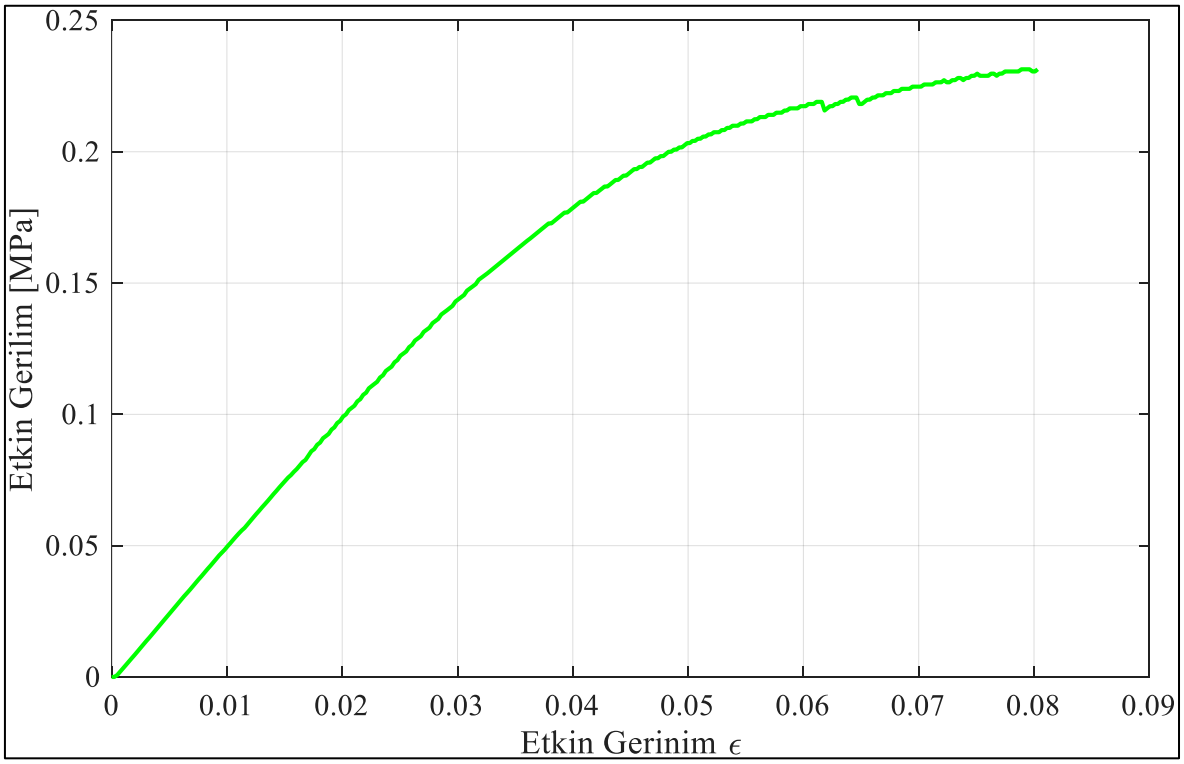
Şekil 6.29. Düzenli kafes yapısı sonlu elemanlar modeli a) x-y düzlemi, b) z-y düzlemi, c) izotropik görünüm

Şekil 6.29'da verilen hibrit kafes sistemi 100x100x100 mm boyutlarındaki birim kafes yapısında olduğu gibi dört yüzlü eleman ağı (tetramesh) kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapı boyutları düzenli kafes sisteminin kiriş yarıçapına ve ağ yapısının boyutunun değişimi göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Bu değerler göz önüne alınarak, yapı 502587 katı elemandan oluşmaktadır.

Hibrit kiriş yapısının sonlu elemanlar analizde, başlangıç ve sınır koşulları birim hibrit kafes yapısında uygulanan koşullar ile aynı tutulmuştur. Alt ve üst plakanın kafes yapısı ile etkileşimi ve kafes yapısının kendi elemanları arasındaki etkileşimi için birim hibrit kafes yapısındaki olduğu gibi AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE ve AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID temas kartları kullanılmıştır. Bu kart değerleri analiz ve deneysel verileler uyumlu olduğu görülen birim hibrit hücre modelinden alınmıştır.

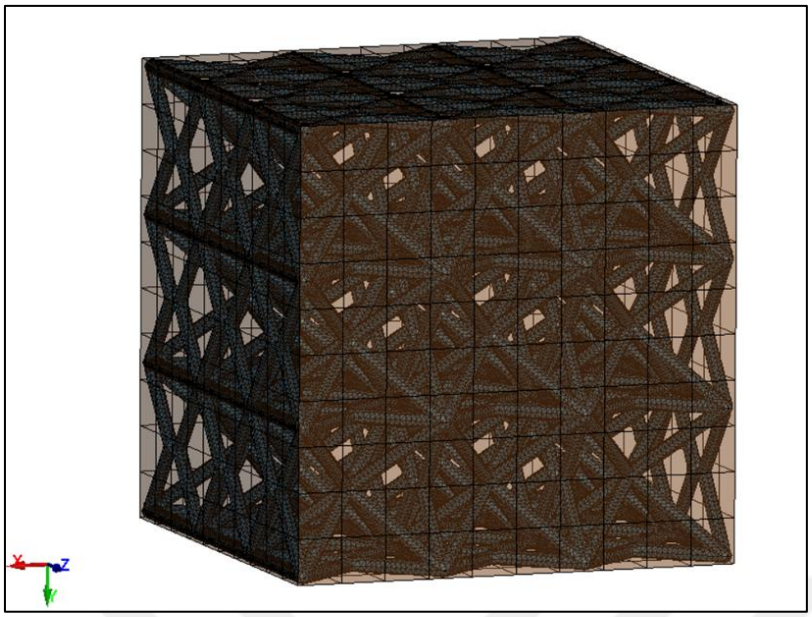
Birim hibrit kafes yapısında olduğu gibi düzgün kafes yapısı ile temas yüzeyleri arasındaki reaksiyon kuvveti kaydedilmiştir. Eş zamanlı olarak yapının birim zamandaki yer değişimi

kaydedilmiş. Bu değerler kullanılarak düzenli hibrit yapını oluşturduğu etkin kafes gerilim ve gerinim değerleri Eş. 6.7 ve Eş. 6.8 yardımı ile hesaplanmıştır. Düzenli hibrit yapının etkin gerilim- gerinim değerleri Şekil 6.30'da verilmiştir.



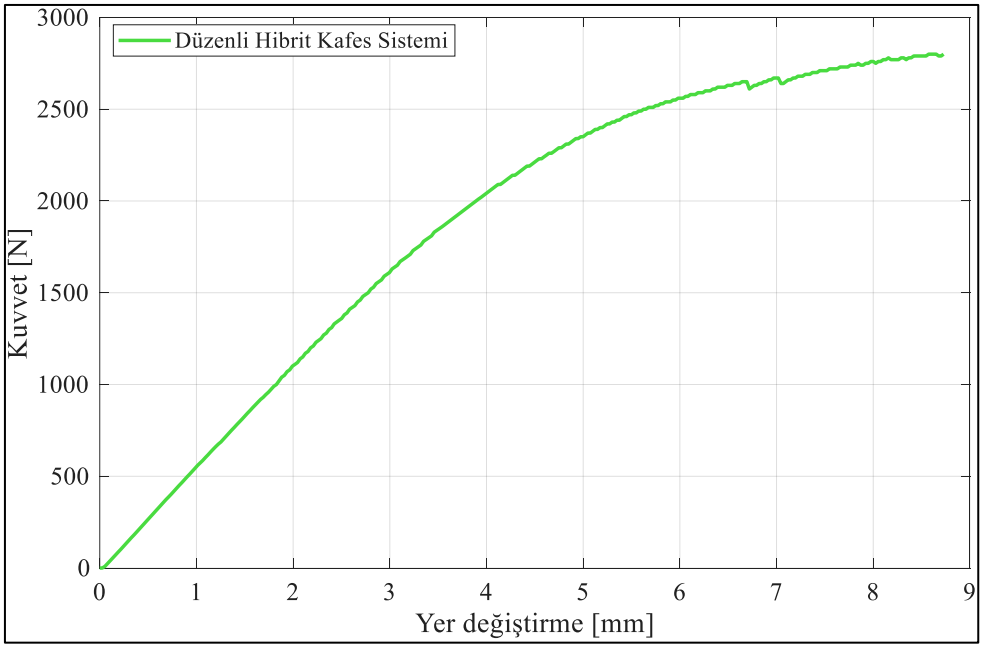
Şekil 6.30. Düzenli hibrit kafes yapısının etkin gerilim- gerinim grafiği

Bir yapının enerji sönümleme kapasitesin en çok etkileyen parametrelerden biri bağıl yoğunluktur. Bu nedenle, kafes sistemi için bağıl yoğunluk tekrardan hesaplanmıştır. Hesaplama, kafes sistemin hacminin, yapıyı tamamen içine alacak küp biçimindeki sınır hacmine oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Şekil 6.31'de belirtilmiştir. Düzenli hibrit kafes sisteminin hacim oranından elde edilen bağıl yoğunluk Eş. 6.9 kullanılmıştır. Düzenli hibrit kafes yapısının bağıl yoğunluğu 0,086 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.31. Düzenli hibrit kafes yapısının hacim oranı

Hibrit kafes yapısının sonlu elemanlar çözümleri yapılarak yapının temas yüzeyi üstünden kuvvet değerleri analiz edilmiştir. Aynı zamanda basma altından yanının yer değiştirme miktarı da analiz edilmiştir. Okunan bu değerler kullanılarak hibrit kafes yapısın etkin gerilim-gerinim eğrisi ve Poisson oranı hesaplanmıştır. Düzenli hibrit kafes sisteminin kuvvet – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.32'te verilmiştir.



Şekil 6.32. Düzenli hibrit kafes sistemi kuvvet- yer değiştirme eğrisi

Elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri kullanılarak yapının enerji sönümleme karakterliği hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kuvvet- yer değiştirme eğrisin altında kalan alan hesabı kullanılmıştır. Bu hesaplama literatürde trapez kuralı olarak adlandırılmaktadır. Trapez kuralı kullanılarak bir yapının enerji ve spesifik enerji sönümleme miktarı hesaplanmaktadır. Bir yapının enerji miktarı hesaplanırken Eş. 6.18 kullanılmaktadır.

$$EA = \int_0^u F(u)\,.\,du \tag{6.18}$$

Eş. 6.18'te u yer değiştirmeyi verirken $F(u)$ ise bu yer değiştirmede kuvveti ifade etmektedir. Sonuç olarak, bir cisme uygulanan kuvvetin, yer değiştirme boyunca yaptığı mekanik iş hesaplanmıştır. Fakat enerji sönümleme kapasitesi tek başına yeterli bir ölçeklendirme değildir. Enerji sönümle kapasitesi yapının birim kütlesine (m) bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple yapının birim kütlesi başına sönümlediği enerji değeri olan özgül enerji sönümleme (Spesific energy absorption, SEA) hesaplanmalıdır. Bir yapının özgül enerji sönümleme değeri Eş. 6.19 kullanılarak hesaplanır.

$$\text{ÖZS} = \frac{\int_0^u F(u)\,.\,du}{m} \tag{6.19}$$

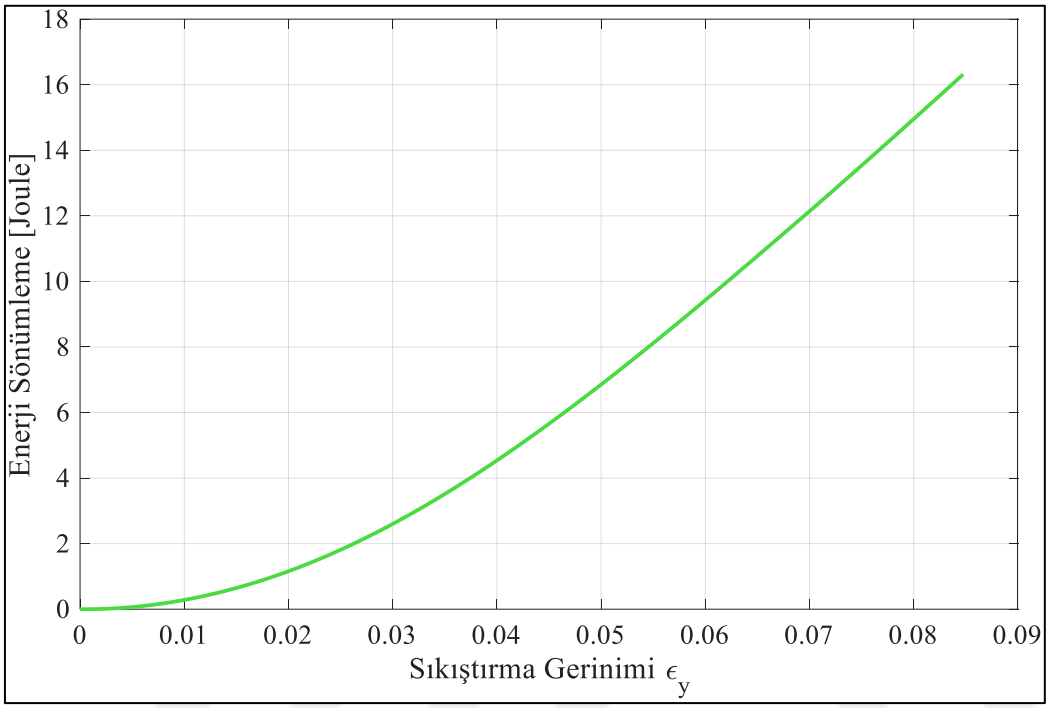
Eş. 6.19 'da tanımlanan m değerinin için hibrit kafes yapısının kütle değeri bilinmesi gerekmektedir. Hibrit kafes sisteminin kütlesinin hesaplanabilmesi için yapının kirişlerinin kapladığı hacim olanından faydalanılmıştır. Düzgün hibrit kafes yapısının kütlesi Eş. 6.20 ile hesaplanmıştır.

$$m = V_{kiriş} * \rho_{PLA} \tag{6.20}$$

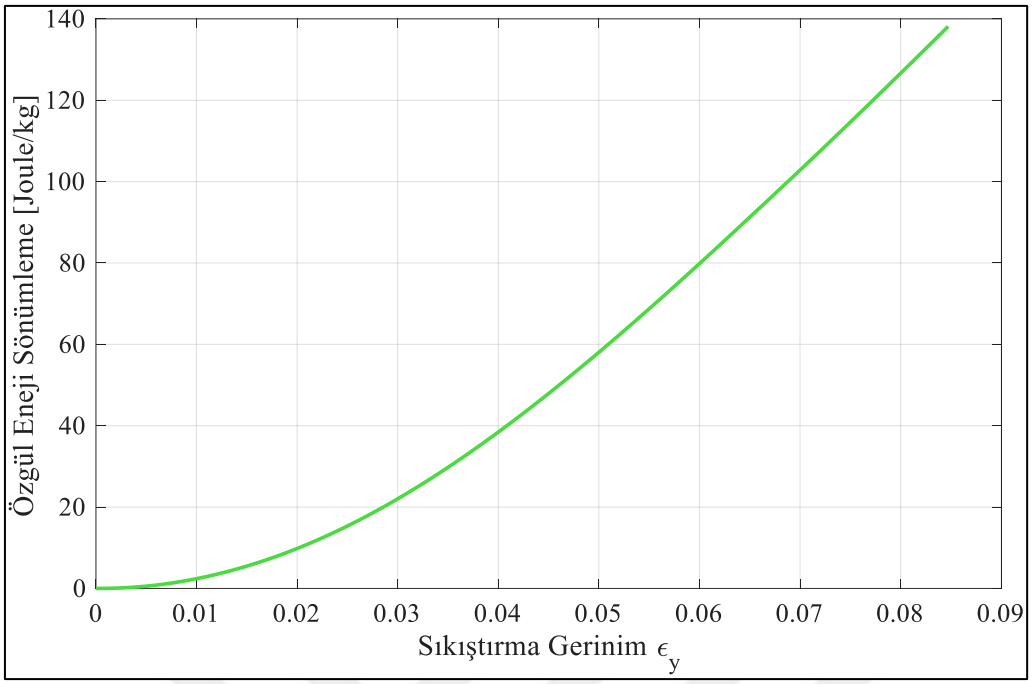
Eş.6.20 de tanımlanan $V_{kiriş}$, kafes siteminin hacim değeri olup 95255,5 mm^3 olarak hesaplanmıştır. ρ_{PLA} değeri ise kafes yapısının malzemesi olan PLA'nın yoğunluğudur. PLA yoğunluğu ise 1,23 g/cm^3 olarak alınmıştır. Eş. 6.20 kullanılarak düzgün hibrit kafes yapısının kütlesi yaklaşık 117g olarak hesaplanmıştır.

Eş. 6.18, Eş.6.19 ve Eş. 6.20 kullanılarak düzenli kibrit yapının sıkıştırılması boyunca yapının enerji sönümlemesi, özgül enerji sönümleme karakteristiği hesaplanmıştır. Düzenli

hibrit yapının enerji sönümleme eğrisi Şekil 6.33'te verilmiştir. Birim kütle başına sönümlediği enerji miktarını gösteren özgül enerji sönümleme eğrisi ise Şekil 6.34'te verilmiştir.



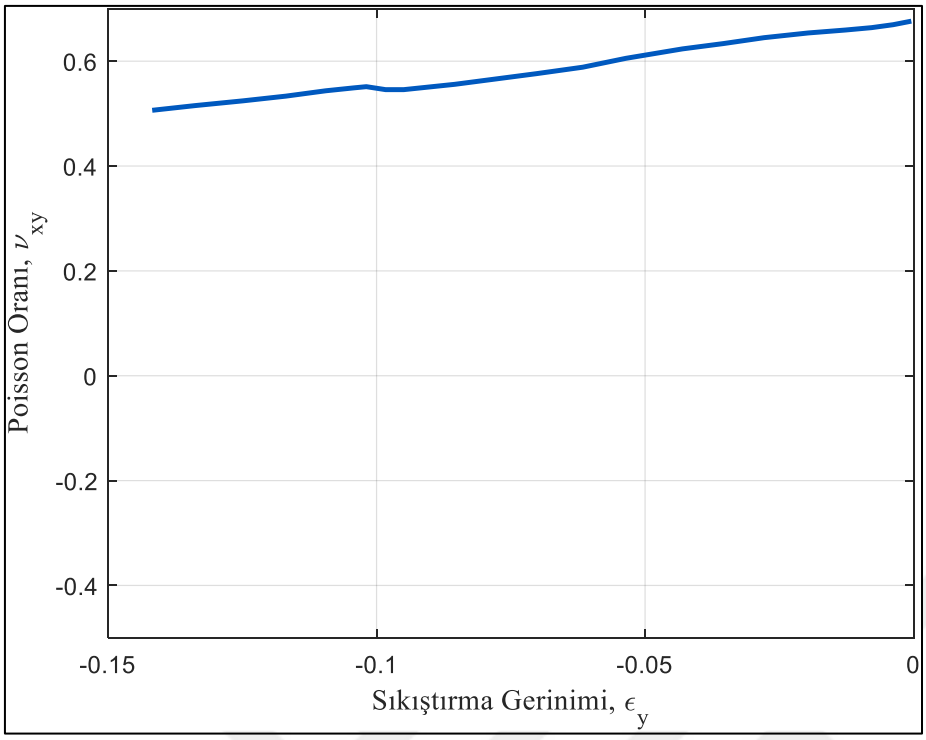
Şekil 6.33. Düzgün hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi



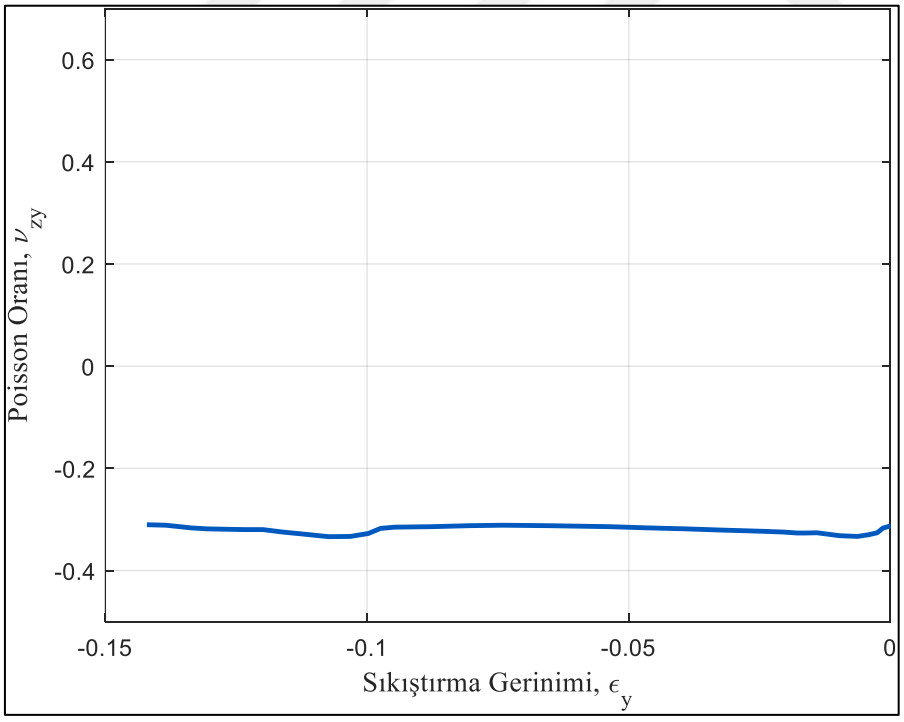
Şekil 6.34. Düzgün hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi

Düzgün hibrit kafes yapısının, birim hibrit kafes yapısı ile aynı benzer şekilde öksetik kafes özelliği göstermesi beklenmektedir. Bu sebeple yapının basma yükü altında yanal gerinim oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamadan kafes yapısın burkulma etkilerinin Poisson oranını eklememesi için yapının orta katmanındaki basma yönü olan y, yanal genişleme/daralma yönü olan x-z yönlerinin değişimleri dikkate alınmaktadır.

Yapılan hesaplamanın bütün kafes yapısı için yapılması durumunda öksetik davranış görülmemiştir. Bu durum kafes sistemlerinde çok karşılaşın bir durumdur. Bu durumun meydana gelmesinin sebebi ise birim hibrit kafes yapı basma yükü altında herhangi bir kafes yapısı tarafından engellenmeyeceği için negatif Poisson oranı çok net görülebilir. Fakat bu tez çalışmasında öksetik yapı ile gövde merkezli kübik yapıların birlikte bulunması yük aktarım mekanizmasını katmanlar arası değiştirmektedir. Öksetik yapının eğilme baskın davranış göstererek negatif Poisson oranı oluştururken, gövde merkezli kübik yapı eksenle yük taşıyarak kapasitesi yüksek olduğu için pozitif Poisson oranı gösterir. Bu sebeple global olarak öksetik olmayan yapı sergiler. Fakat katmanlar arası yük taşıma mekanizmasının değişmesi sebebiyle orta katmandaki hücre açıları eğilme-dominant deformasyon göstererek negatif Poisson oranı oluşmasına sebep olmuştur. Düzenli hibrit yapının Poisson oranı değerleri Şekil 6.35 – Şekil 6.36'da verilmiştir.



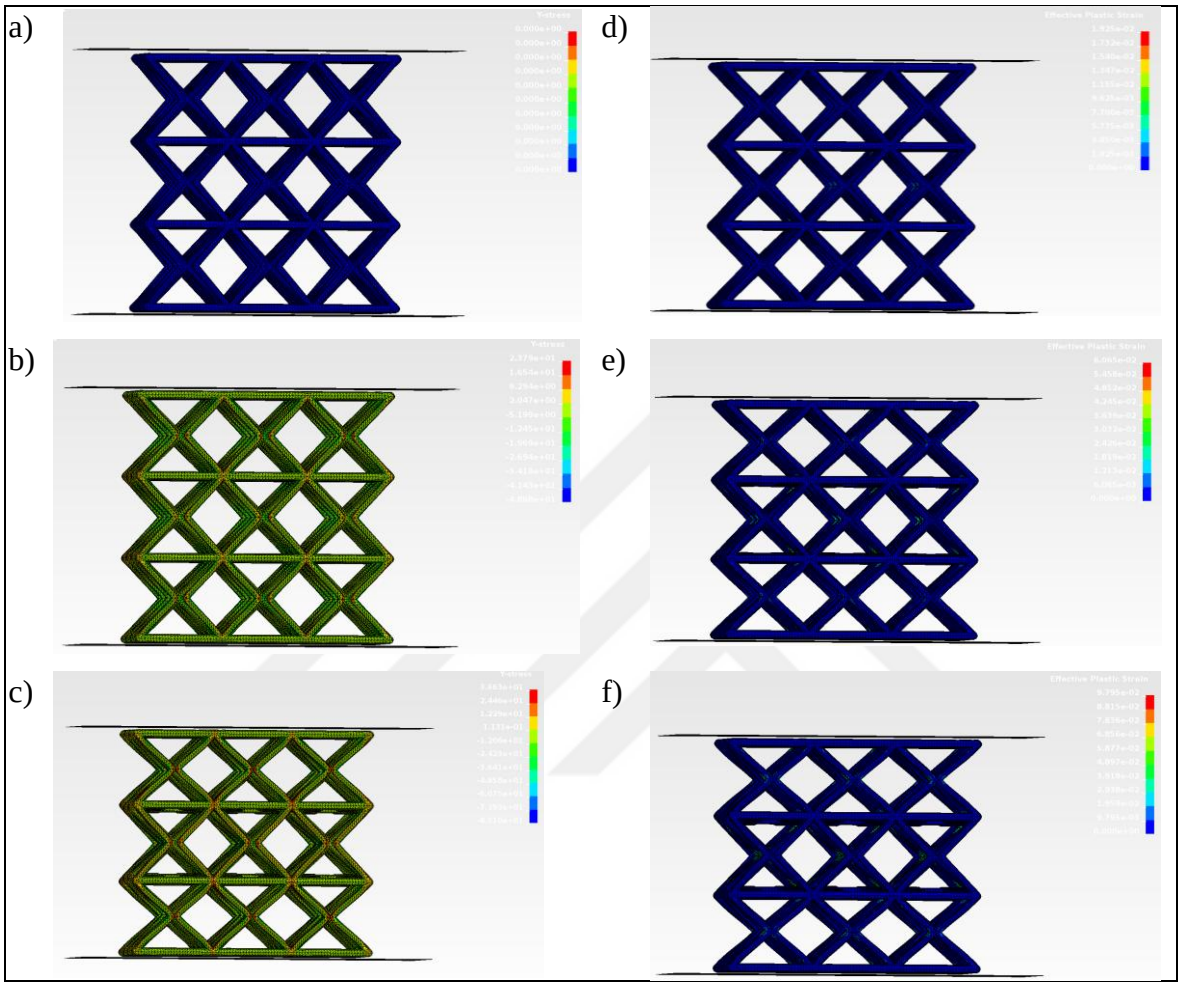
Şekil 6.35. Düşey sıkıştırma boyunca x yönündeki Poisson oranı değişimi



Şekil 6.36. Düşey sıkıştırma boyunca z yönündeki Poisson oranı değişimi

Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 göre düzenli hibrit yapı sistemi xy düzleminde pozitif Poisson oranı gösterirken zy düzleminde belirgin ve kararlı biçimde negatif Poisson oranını sahiptir. Bu

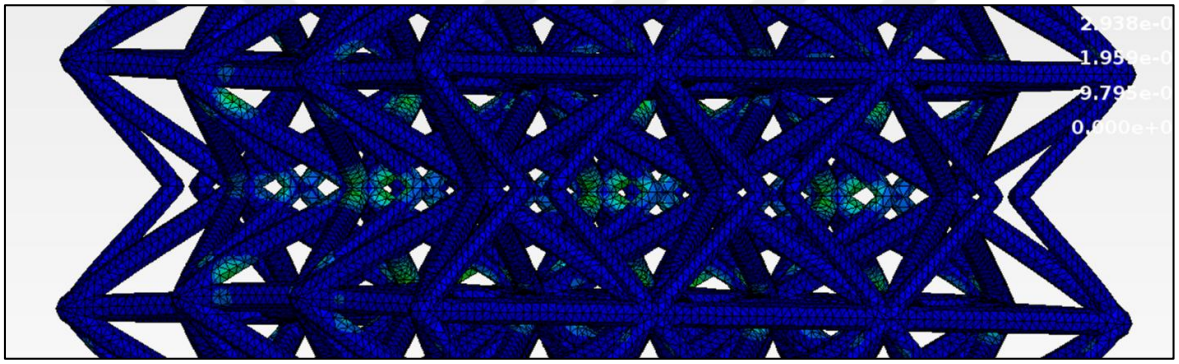
durum, yapının anizotropik öksetik karakterde olduğunu ve öksetik yapının belirli düzlemlerde etkinliğini göstermiştir.



Şekil 6.37. Hibrit kafes yapının basma yükü altındaki üç farklı deformasyon seviyesinde gerilme (sol) ve etkin plastik gerinim (sağ) dağılımlarının karşılaştırılması: a-f) elastik bölgedeki davranış seviyesi, b-e) plastik deformasyonun başladığı orta deformasyon seviyesi, c-f) lokal gerilme birikimi ve plastik deformasyon

Şekil 6.37'de gösterilen düzgün hibrit kafes yapısının deformasyon şekilleri gösterilmiştir. Elastik bölgedeki davranış seviyesinde düzgün hibrit yapının elastik bölge davranışına yakın bir davranış gösterdiği görülmüştür. Plastik gerinim değerinin çoğunlukla sıfıra yakın olduğu ve plastik davranışının öksetik hücrelerin iç köşe birleşimlerinde sınırlı bir şekilde başladığı görülmüştür. Basma yönü gerilim değerlerine bakıldığında, aynı bölgelerde basma gerilmesinin yoğunlaştığını görülmüştür. Bu deformasyon, yük aktarımının diyagonal kirişler üzerinden gerçekleştiğini ve gerilmenin orta tabakadaki eklem noktalarında toplandığını göstermektedir. Yapıda henüz burkulma başlamamış fakat lokal gerilme

birikimleri ilerleyen deformasyon adımlarında yerel burkulmaların başlayacağının işaretini vermektedir. Bu deformasyon mekanizması literatürde öksetik yapılara özel olarak eğilme hâkimiyeti ve kolların dönmesine dayalı deformasyon tekniği olarak rapor edilmiştir (Choudhry, Panda ve Dixit, 2023). Lokal gerilme birikimi ve plastikleşmeyi bölgesindeki deformasyon şekli incelendiğinde literatürde öksetik yapılar için tanımlanan eğilme hakimiyetli ve düğüm dönmesine dayalı deformasyon şekli görülmektedir (Bashtani, Etemadi, Hu ve Moradi, 2024; Shen ve diğerleri, 2023). Gerilim dağılımı, yükün öksetik hücrelerin düğüm noktalarında yoğunlaşırken, düğüm noktalarında plastik deformasyonun arttığı görülmüştür. Bu davranış öksetik yapının düğüm noktalarının dönmeye başlamadığını ve kirişlerin eğilmeye başladığını göstermektedir.



Şekil 6.38. Düzenli hibrit kafes yapısının orta katmanı plastik deformasyonu

Şekil 6.38’de son deformasyon bölgesi için yapının orta katmanındaki plastik deformasyon gösterilmiştir. Şekil 6.38’e bakıldığında orta katmandaki plastik deformasyonun bir bant boyunca yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum literatürde kafes yapılar için tanımlanan lokal burulma ve kesme bent başlangıcı ile uyumludur (Széles, Horváth ve Réger, 2024 ; Choudhry ve diğerleri, 2023). Şekil 6.38’de deformasyon şekli öksetik hücrelerin kopma öncesi karakterizasyonunu gösterip hasarın bu bölgelerde başlayacağını göstermektedir.

6.5. Gradyan Hibrit Kafes Yapısı

Çalışmanın önceki bölümlerinde geometrisi ve mekanik davranışları incelenen hibrit kafes yapısı, bu bölümde aynı yapı içinde gradyan özellik gösterecek biçimde yeniden tasarlanmıştır. Gövde merkezli kübik ve öksetik hücre yapılarından oluşan hibrit kafes yapısı, kafes sisteminin doğası gereği negatif Poisson oranı sağlarken taşıyıcı kapasitesi

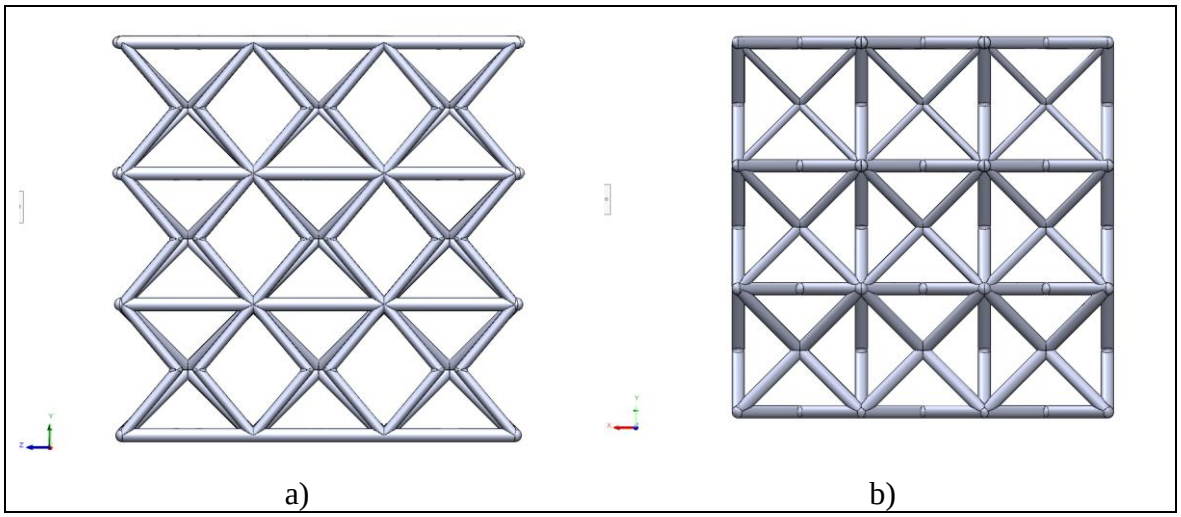
arttırması, katmanlar arasındaki özellik değişimlerinin yapının genel davranışına etkilerin analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Gradyan kafes yapısının temel amacı, hücre geometrisinin belirli yönlerde sistematik olarak değiştirilmesiyle yapının enerji sönümleme davranışının, tepe kuvvetinin ve mekanik tepkilerin kontrol altına alınmasıdır. Bu kapsamda tez çalışmasında iki farklı gradyan yapı üzerinde inceleme gerçekleştirilmiştir.

6.5.1. Birinci gradyan hibrit kafes yapısı

Birinci gradyan modelde, 3x3x3 hibrit kafes yapısının her katmanındaki gövde merkezli kübik yapısının hücrenin kiriş yarıçapı bir üst katmana geldikçe 2 mm azaltılmış, öksetik karakteristik gösteren hücresinin kiriş yarıçapı ise sabit tutulmuştur. Bu sayede gradyan hibrit kafes yapısı ile düzenli hibrit kafes yapısı karşılaştırılarak, destekleyici eleman olan gövde merkezli kübik yapının katkısı ve etkinliği araştırılmıştır. Kafes sistemi Şekil 6.39'da sunulmuştur.

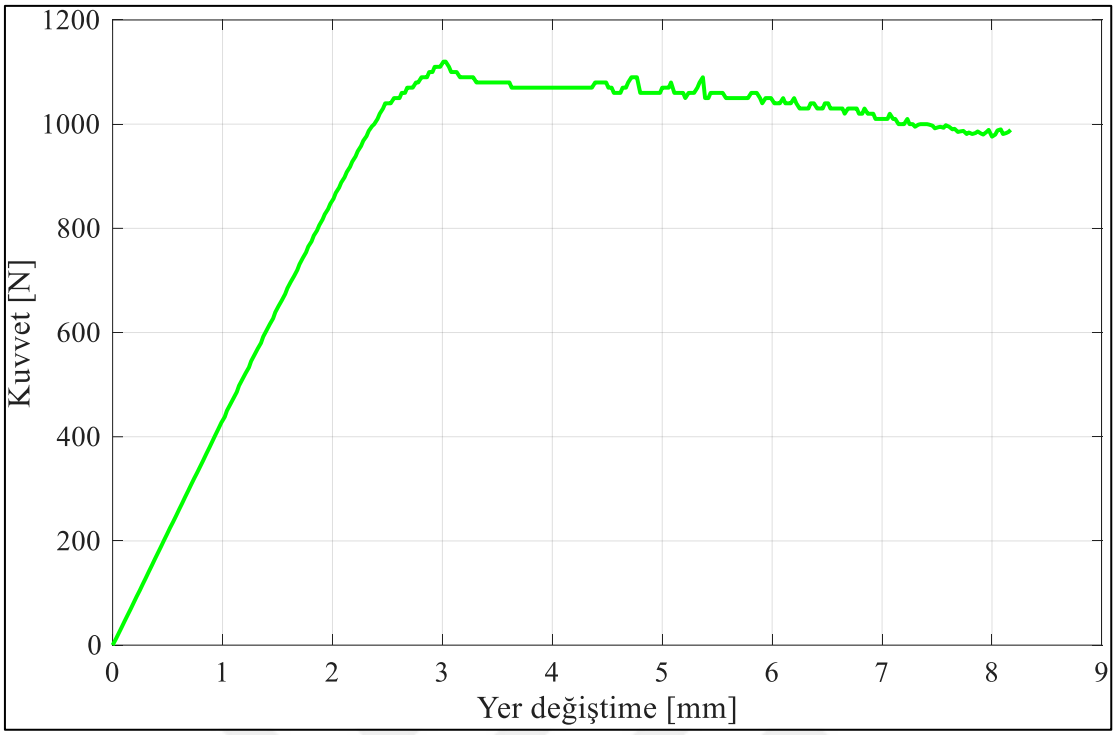
Birinci gradyan kafes yapısı HYPERMESH üzerinden ağ yapısı örülmüştür. Burada kiriş yarıçaplarının değişmesi ağ yapısının boyutunu değiştirmiştir. Sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmeden önce yapılan çalışmaya temel alarak kiriş yapılarını davranışlarını doğru karşılayacak bir ağ yapısı boyutu belirlenmiştir. Her katmandaki öksetik yapıların kiriş yarıçapının değişmemesi sebebi ile öksetik yapının her katmanda ağ boyutu aynı kalırken, destek eleman olan gövde merkezli kübik yarıçapına bağlı olarak her katmanda ağ boyutu küçültülmüştür.



Şekil 6.39. Birinci gradyan hibrit kafes sistemi tasarımı: a) z-y düzlemi, b) x-y düzlemi

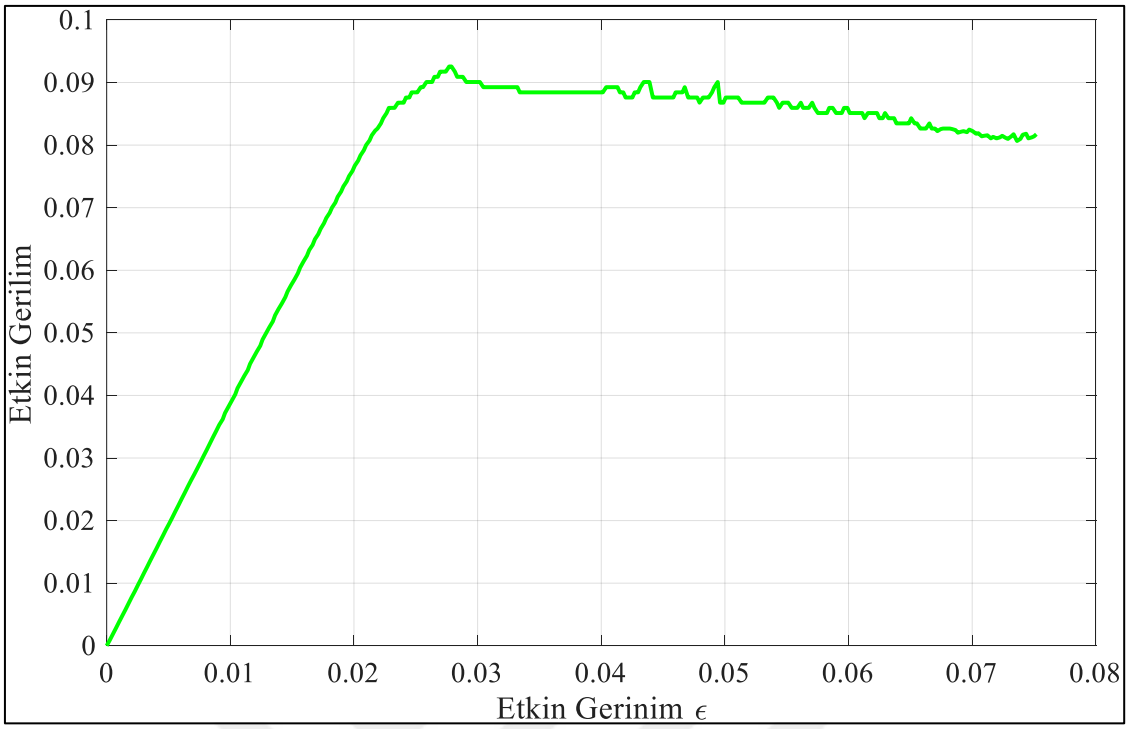
Sonlu elemanlar çözümleri LS-DYNA kullanılarak yapılmıştır. Düzenli hibrit yapı ile karşılaştırılmalarında hata oranında ve oluşabilecek belirsizliklerden kaçınmak için gradyan hibrit kafes yapısının modellemesi, başlangıç ve sınır koşulları düzenli hibrit kafes yapısı ile aynı kullanılmıştır.

Düzenli kafes yapısında olduğu gibi gradyan hibrit kafesi ile sıkıştırma düzlemi arasındaki reaksiyon kuvveti kaydedilmiştir. Sıkıştırma sonucu gradyan hibrit yapının reaksiyon kuvveti değişimi Şekil 6.40'ta verilmiştir.



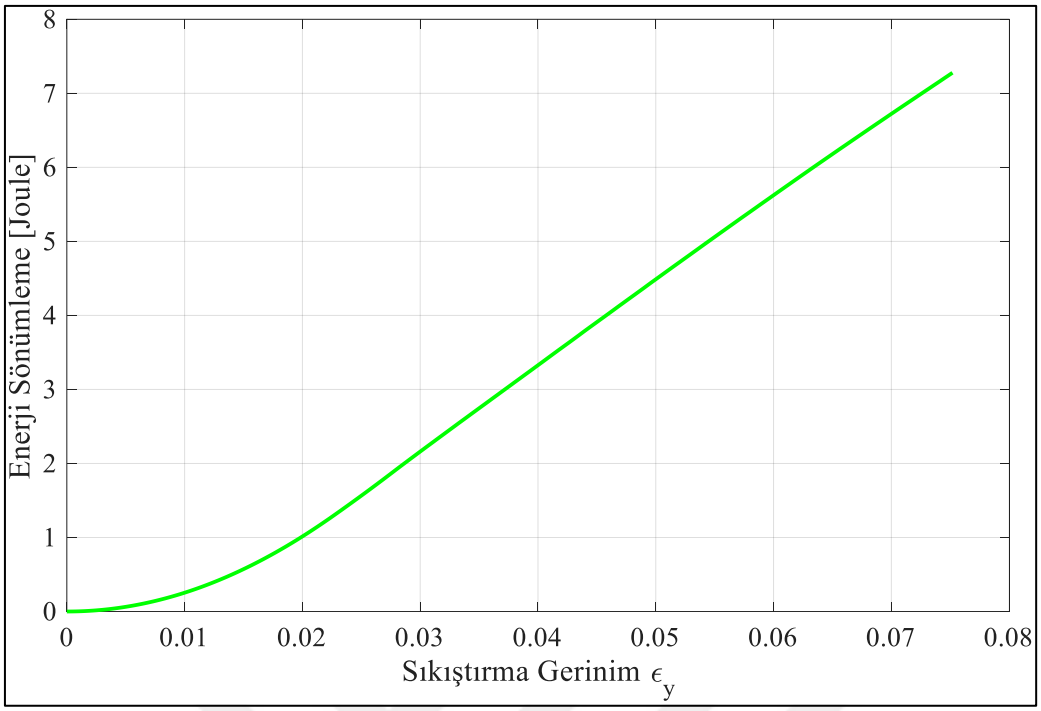
Şekil 6.40. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının yer değişmeye göre reaksiyon kuvvet eğrisi

Şekil 6.40'ta yardımı ile gradyan hibrit kafes yapısı için etkin gerilim Eş. 6.7 yardımıyla hesaplanmıştır. Aynı şekilde, hibrit kafes yapısının birim zamanda yer değişimi kaydedilmiştir. Yer değişimin değeri ile Eş. 6.8'den yararlanılarak gradyan hibrit kafes yapısının etkin gerinim değeri hesaplanmıştır. Birinci gradyan yapıya ait etkin gerilim – gerinim eğrisi Şekil 6.41'de sunulmuştur. Özgül enerji hesaplama değeri için hibrit kafes yapısının kütle değerinin hesaplanması gerekmektedir. Eş. 6.20 yardımı ile hibrit yapının kütlesi hesaplanmıştır. Hibrit yapının kirişlerin oluşturduğu hacim 79171,8 mm^3 olarak hesaplanmıştır. PLA malzemesinin yoğunluğu ise 1,23 g/cm^3'tür. Bu değerler ile gradyan hibrit kafes yapısının kütlesi 97,4 g olarak hesaplanmıştır.

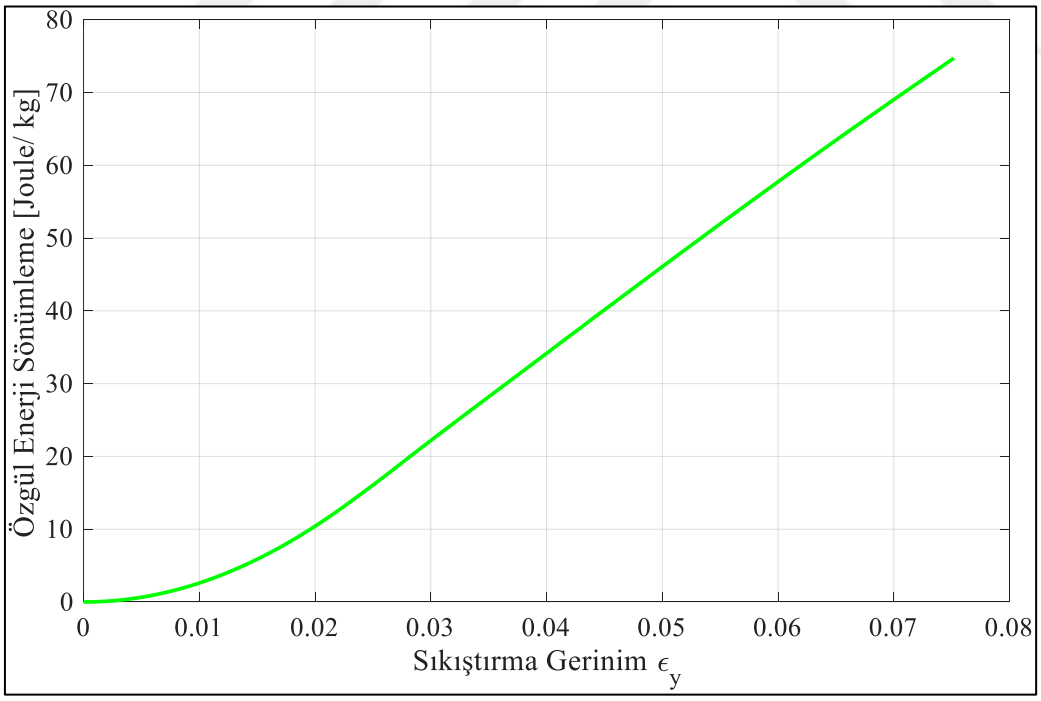


Şekil 6.41. Birinci gradyan kafes yapısının etkin gerilimi gerinim eğrisi

Sonlu elemanlar analizleri ile gradyan yapının oluşturduğu reaksiyon kuvveti aynı zamanda gradyan yapının enerji sönümlemesi ve özgül enerji sönümleme değerinin hesaplanması için kullanılmıştır. Hesaplamalarda trapez kuralı kullanılmış. Eş. 6.18 ve Eş. 6.19 yardımıyla gradyan hibrit yapının enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme değeri hesaplanmıştır. Hesaplama sonucu gradyan hibrit kafes yapısının enerji sönümleme ve özgül enerji sönümler değeri Şekil 6.42- Şekil 6.43'te verilmiştir.

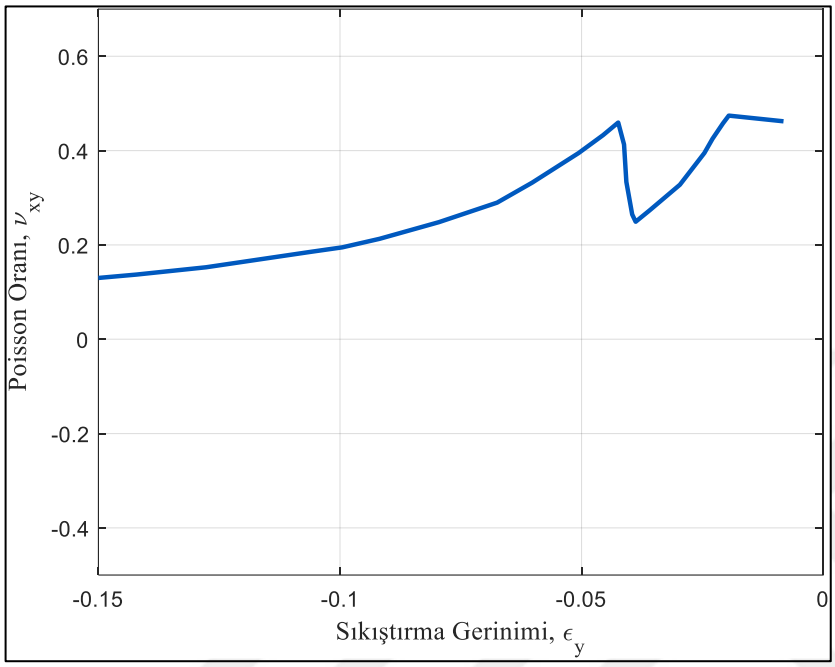


Şekil 6.42. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi

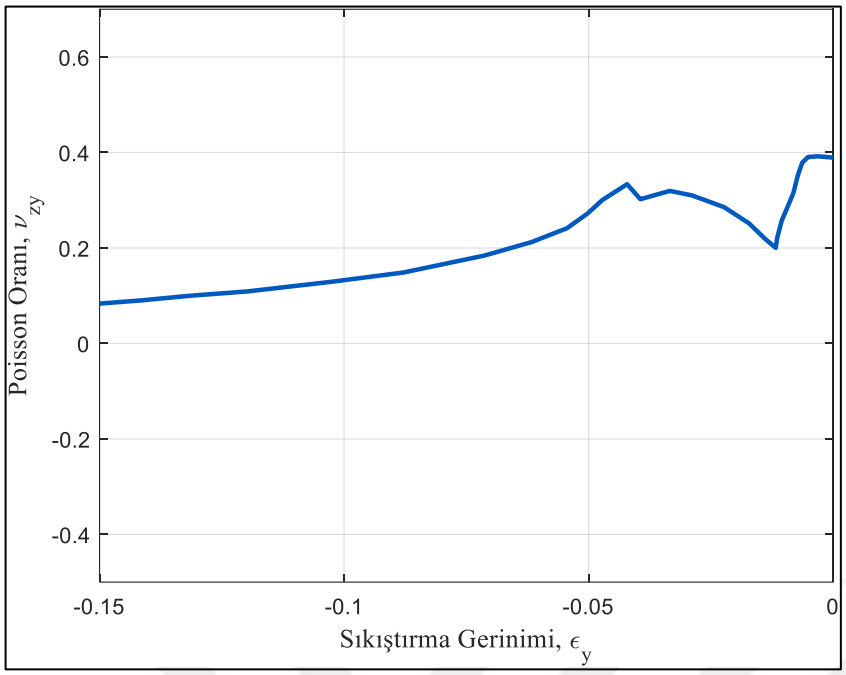


Şekil 6.43. Birinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi

Şekil 6.41'de görüldüğü gibi gradyan kafes yapısı üç aşamalı bir deformasyon mekanizmasına sahiptir. Bu davranış Poisson oranlarında da görülmektedir. Yapının sıkıştırma altındaki Poisson oranı değişimleri Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te verilmiştir.

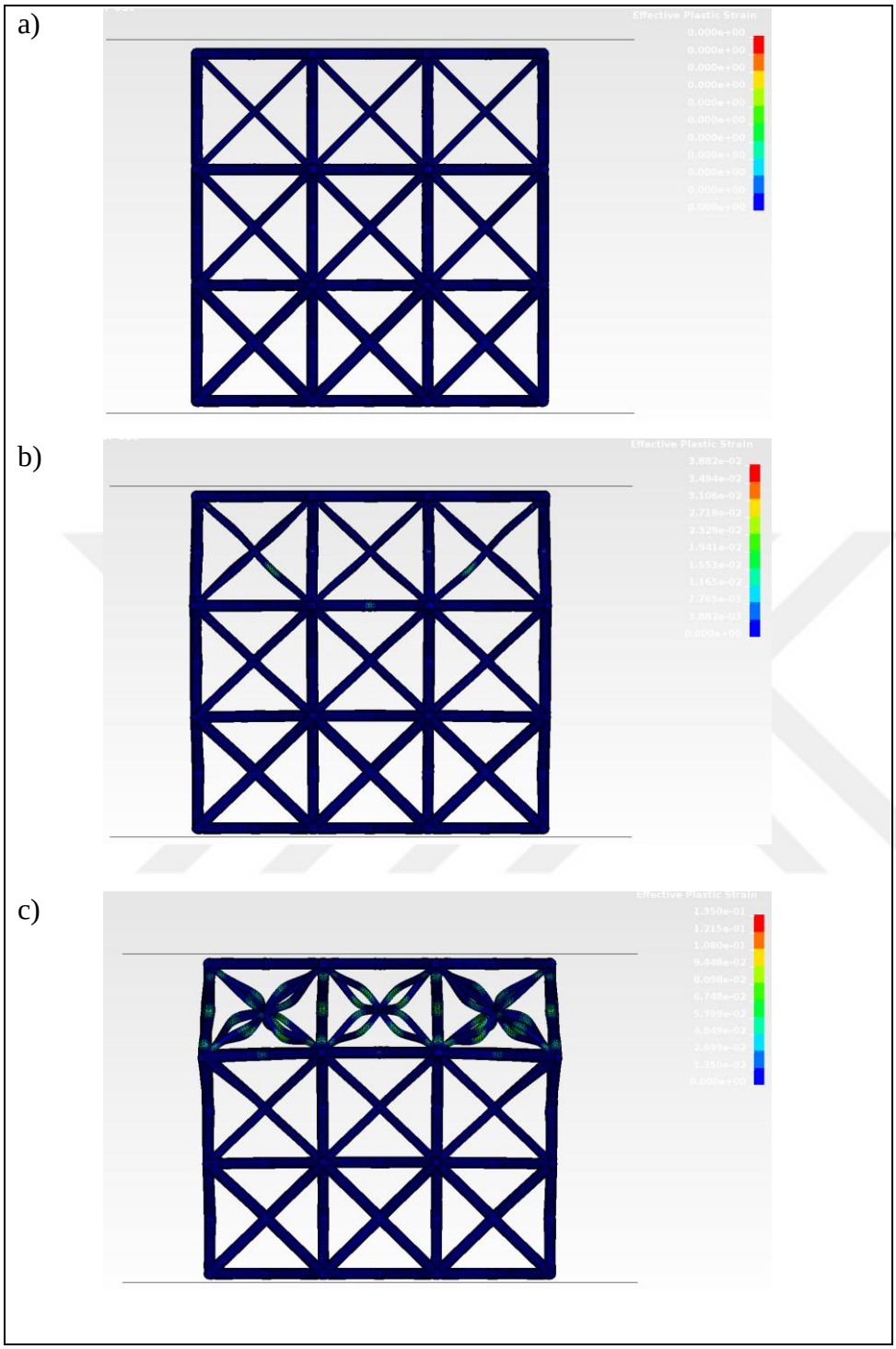


Şekil 6.44. Birinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca x yönlü Poisson oranının değişimi



Şekil 6.45. Birinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca z yönlü Poisson oranının değişimi

Birinci hibrit kafes yapısının deformasyon şekilleri sıkıştırma boyutça incelenmiştir. Gradyan yapının sıkıştırma boyunca plastik şekil değiştirme deformasyonu Şekil 6.46'da verilmiştir.



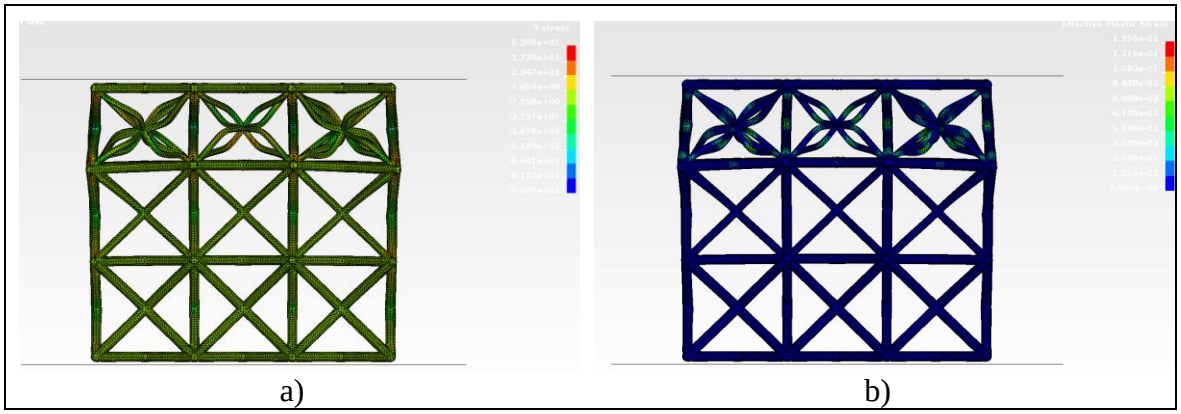
Şekil 6.46. Birinci gradyan hibrit yapının deformasyon şekilleri: a) ilk deformasyon, b) Orta deformasyon, c) İleri deformasyon

Şekil 6.46'da sıkıştırma yükünün ilk aşamasında yapı tamamen elastik rejimde olup kiriş elemanları boyunca herhangi bir gerinim birikimi gözlenmemektedir. Yükün artmasıyla birlikte orta seviye deformasyon aşamasında ilk plastik belirtileri üst katmandaki diyagonal elemanların düğüm bölgelerinde ortaya çıkmıştır. Bu durum, gövde merkezli kübik

hücrelerinde yükün eksenel olarak değil ağırlıklı olarak diyagonal çubuklar üzerinden taşınması nedeniyle oluşan eğilme momentlerinin lokal olarak artmasından kaynaklanmaktadır.

İleri deformasyon aşamasında ise üst katmandaki hücrelerde belirgin bir burkulma davranışına gelişmiştir. Diyagonal elemanlarda görülen kelebek benzeri dönme-eğilme şekil değiştirmesi, düzgün kafes yapısında da görülen eğilme hâkimiyeti ve düğüm dönmesine dayalı deformasyon şekli görülmektedir deformasyon şekline karşılık gelmektedir.

Birinci hibrit kafes yapısının genel durumuna baktığımızda, yapının ilk olarak 0-0,02 gerinim aralığında doğrusal elastik bir davranış sergilediği görülmüştür. Yaklaşık 0,03 gerinim değerlerinde platoların oluştuğu görülmüştür. Aynı zamanda hibrit yapının ilk burkulmasının meydana geldiği açıktır. 0,03 ile 0,06 gerinim değeri aralığında hücrelerin ardışık çökmesiyle sabit plato bölgesine girmiştir. Bu bölgede enerji sönümleme değeri artmıştır. 0,06 gerinim değeri sonrasında hem gerilme hem de Poisson oranının dalgalanması Şekil 6.47'de görüleceği gibi burkulma sonrası yumuşak davranışın başladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, birinci hibrit kafes yapısının karmaşık fakat kontrollü bir yük taşıma mekanizması oluşturulduğu görülmüştür.

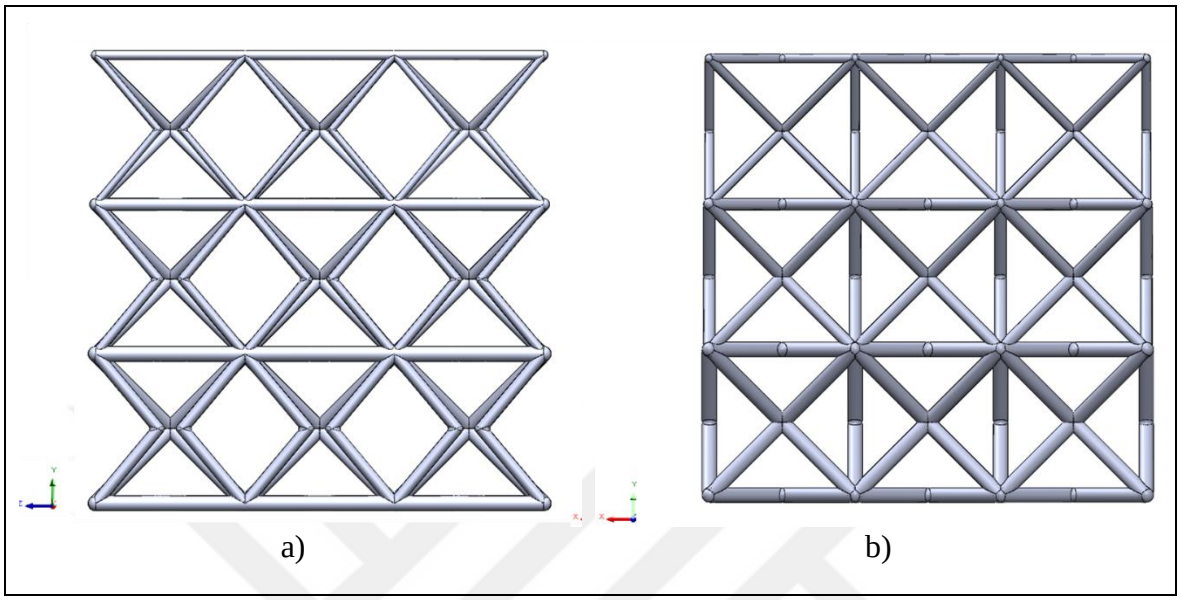


Şekil 6.47. İleri plastik aşaması: a) Gerilim yayılımı, b) plastik gerinim yayılımı

6.5.2. İkinci gradyan hibrit kafes yapısı

İkinci gradyan hibrit kafes sisteminde, 3x3x3 kafes sisteminin her katmanında hem öksetik hücrelerin hem de gövde merkezli kübik hücrelerin kiriş yarıçapları aynı oranda azaltılarak,

en alt tabakadan en üste tabakaya doğru katmanların bağıl yoğunluğu artırılan bir gradyan hibrit kafes yapısı elde edilmiştir. İlgili kafes sistemi Şekil 6.48'de sunulmuştur.

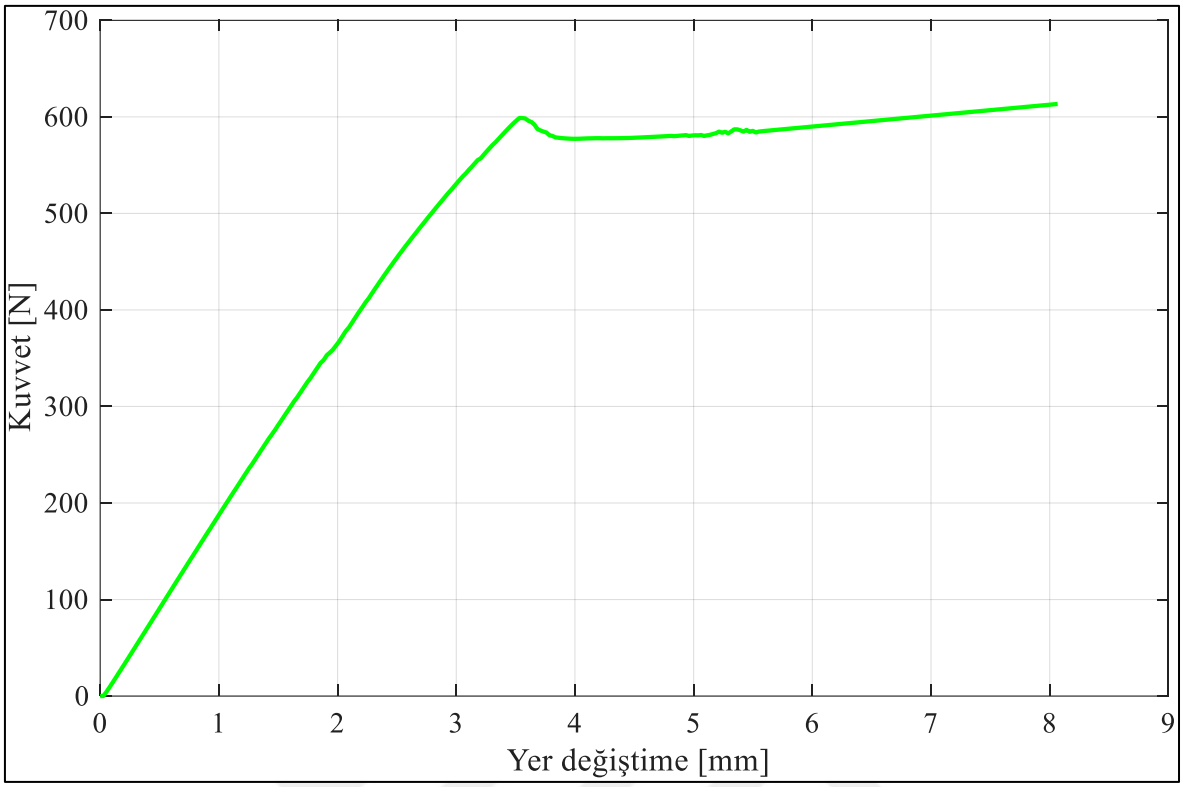


Şekil 6.48. İkinci gradyan hibrit kafes sistemi tasarımı: a) z-y düzlemi, b) x-y düzlemi

Gradyan hibrit yapısı tasarım sürecinde, iç doluluk, bağıl yoğunluk ve hücre mesnet davranışı arasındaki uyum dikkat edilmesi gerekilen tasarım kriterleridir. Bu sebeple, gradyan yapı oluşturulurken geometrik parametrelerin yanı sıra toplam bağıl yoğunluğunun düzenli kafes sistemi ile karşılaştırılabilir düzeyde kalmasına özen gösterilmiştir.

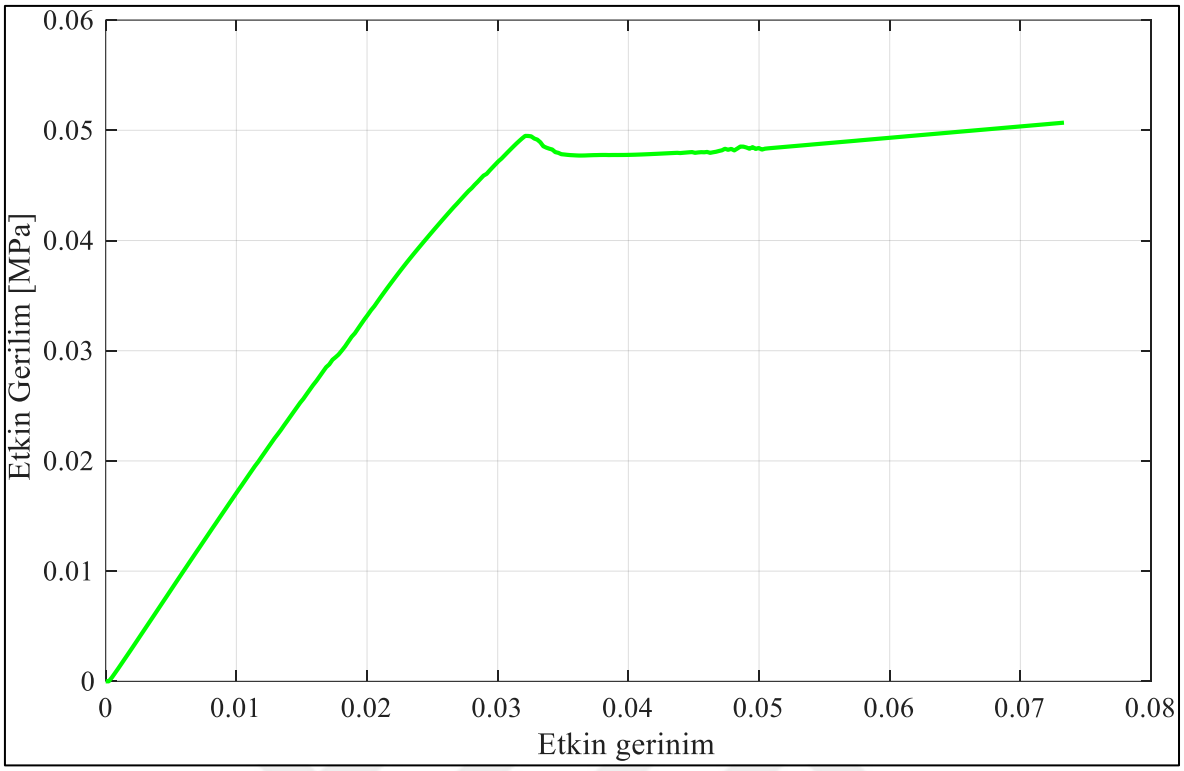
Gradyan hibrit kafes yapılarında uygulanan yükleme ve sınır koşulları, düzenli hibrit kafes yapısında kullanılan koşullarla tamamen aynı tutulmuştur. Kafes yapısı ile yüzeyler arasındaki sürtünme katsayıları ve temas parametreleri de düzenli hibrit kafes yapısı ile aynı tutulmuştur. Böylece, ilerleyen bölümde yapılacak karşılaştırmalarda ortaya çıkacak farkların yalnız geometrik gradyan etkisinden kaynaklanması sağlanmış ve analiz süresince hataya sebep oluşturabilecek değişkenler kontrol altına alınmıştır.

İkinci hibrit kafes yapısı için de baskı yüzeyi ile kafes yapısı arasındaki reaksiyon kuvveti sonlu elemanlar analizlerinde kaydedilmiştir. Diğer iki kafes yapısı ile aynı yer değiştirme eğrisi ile sıkıştırılan ikinci gradyan kafes yapısına ait kuvvet – yer değiştirme eğrisi Şekil 6.49'da verilmiştir.



Şekil 6.49. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının kuvvet- yer değiştirme eğrisi

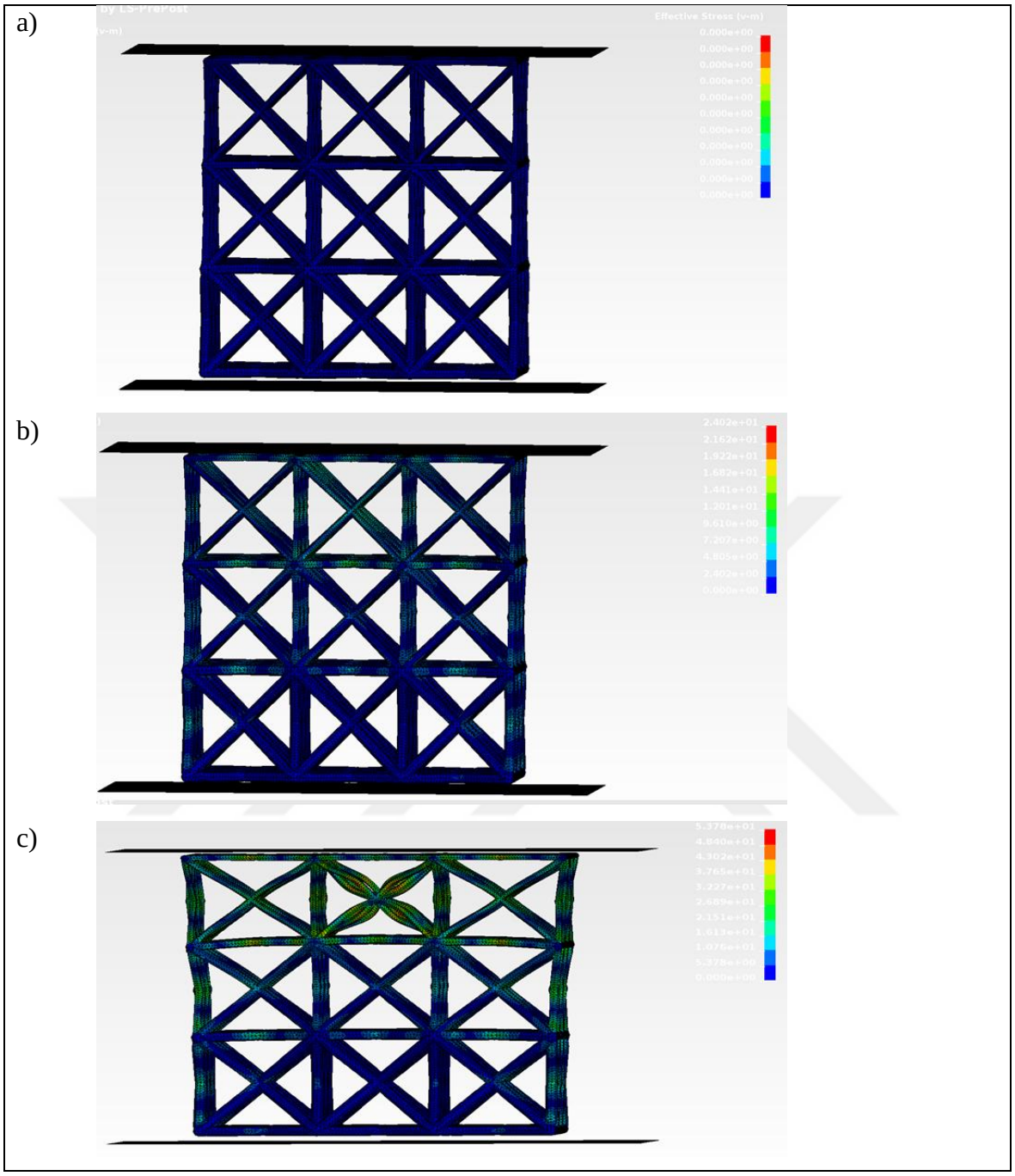
Hibrit kafes yapısının gözenekli yapısından dolayı sahip olduğu gerilme gerinim değerleri diğer iki yapıda olduğu gibi Eş. 6.7 ve Eş. 6.8 yardımı ile hesaplanmıştır. İkinci gradyan yapıya ait etkin gerilme- gerinim eğrisi Şekil 6.50'de sunulmuştur.



Şekil 6.50. İkinci gradyan hibrit yapısının etkin gerilme gerinim eğrisi

Şekil 6.49 ve Şekil 6.50 incelendiğinde, hibrit kafes yapısının basma yükü altındaki mekanik davranışı üç temel evrede geliştirdiği görülmektedir. Eğrilerin başlangıç bölümünde kuvvetin yer değiştirme ile yaklaşık doğrusal bir artış göstermesi, yapının bu aşamada doğrusal elastik bir davranış sergilediğini göstermektedir. Yer değiştirme arttıkça kuvvet ve gerilim artış hızında belirgin bir değişim meydana gelmiştir. Bu geçiş bölgesi elastik-plastik geçiş bölgesini ve dolayısı ile yapının akma sürecine girdiğini göstermektedir. Eğrilerin ilerleyen kısımlarında kuvvet ve gerilim değerlerinin sabit bir eğimle artmaya devam etmesi yapının ani bir yük kaybı yaşamadığını ve deformasyonun kontrollü bir şekilde ilerlediğini göstermiştir.

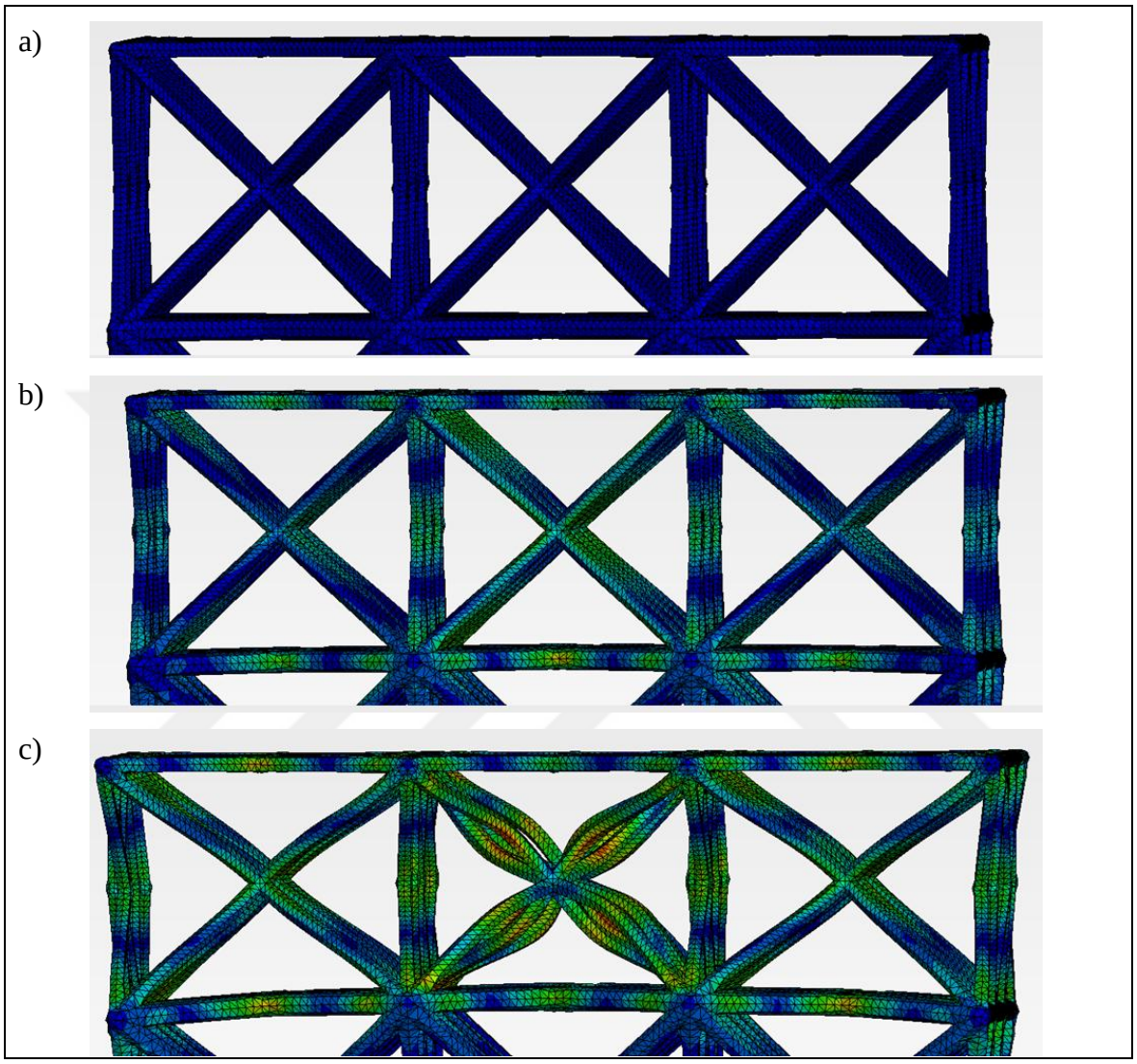
Bu değerler göz önüne alındığında yapının deformasyon şekilleri incelenmiştir. Şekil 6.51'de ikinci gradyan hibrit yapının deformasyon aşaması gösterilmiştir.



Şekil 6.51. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının basma yükü altında a) Başlangıç deformasyon, b) orta deformasyon, c) ileri deformasyon

Şekil 6.51 ve Şekil 6.52'de görüldüğü gibi hibrit yapının basma yükü altında deformasyonun kademeli ve bölgesel olarak geliştiği görülmektedir. Yükün büyük ölçüde gövde merkezli kübik yapıda taşındığı görülmektedir. Orta deformasyon bölgesinde kirişlerin eğilme etkisinin belirginleştiği ve yük artıma homojenliğinin bozulduğu görülmüştür. İleri deformasyon bölgesinde ise yapıdaki öksetik hücrelerin dönme ve eğilme mekanizmasına geçiş yaptığı görülmüştür. Bu durum, hibirt kiriş yapısı için geometrik uyum ve kiriş bazlı

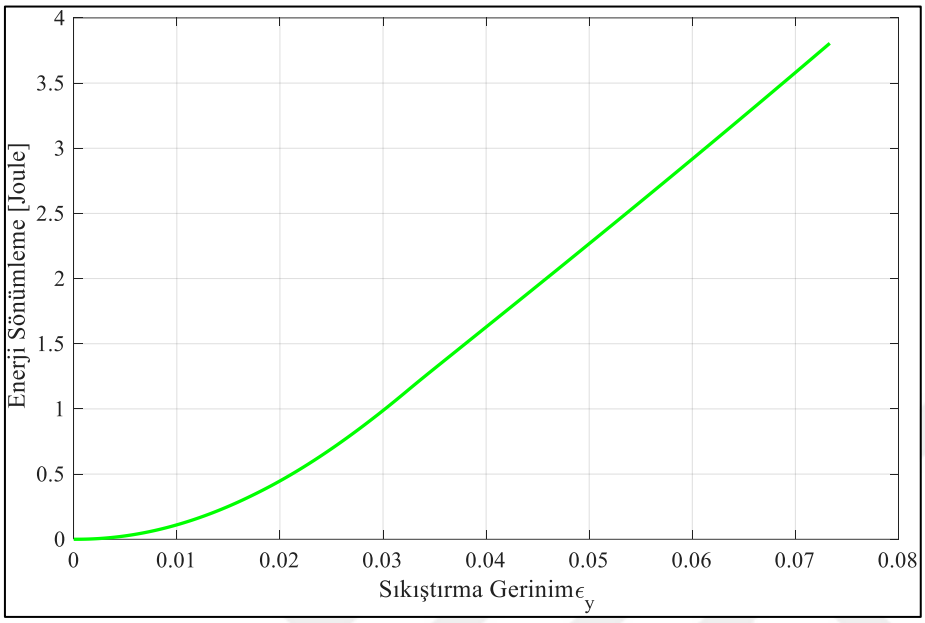
deformasyon mekanizmasının yük altında kontrollü şekil değişimine sahip olduğunu göstermektedir.



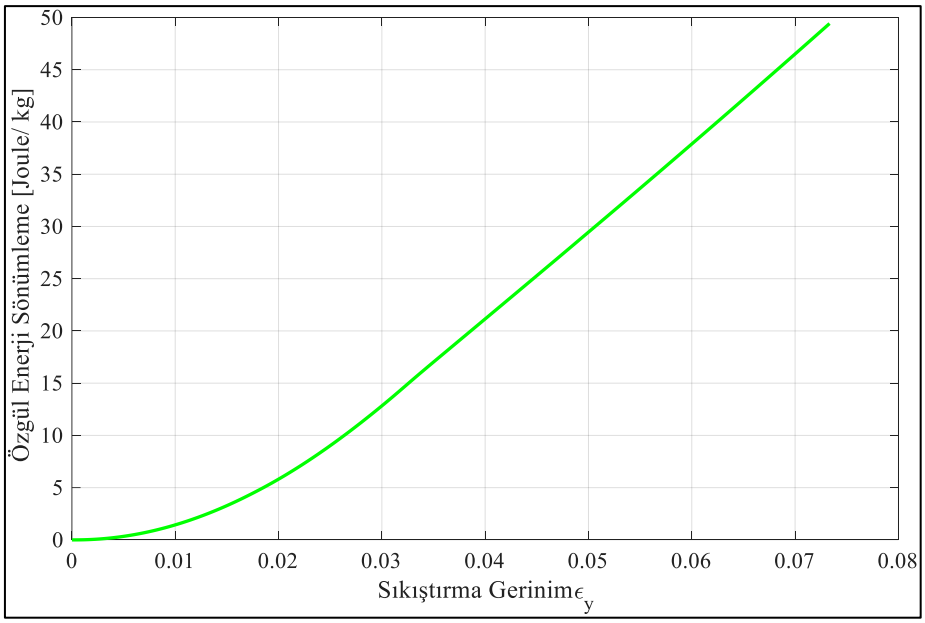
Şekil 6.52. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının basma yükü altında kiriş bazlı a) başlangıç defromasyonu, b) orta deformasyon, c) ileri deformasyon

Diğer iki kafes yapılarındaki metodoloji ile aynı tutularak yapının enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme değeri kuvvet altında kalan alan hesaplanması ile yapılmıştır. Bu alan hesapları matematiksel olarak Eş. 6.18 ve Eş. 6.19'da gösterilmiştir. Özgül enerji sönümleme değerinin hesaplanması için öncelikli olarak ikinci gradyan yapının kütlesinin hesaplanması gerekmektedir. Sonlu elemanlar sonuçlarına göre gradyan kafes yapısının kirişlerinin sahip olduğu hacim 62596,5 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Diğer iki kafes yapısı ile aynı malzeme kullanıldığından dolayı PLA yapının yoğunluk değeri 1,23 g/cm^3 olarak

alınmıştır. Böylelikle yapının kütlesi 76.99 g olarak bulunmuştur. İkinci gradyan yapıya ait enerji sönümleme değerleri ve özgül enerji değerleri Şekil 6.53 ve Şekil 6.54'te verilmiştir.

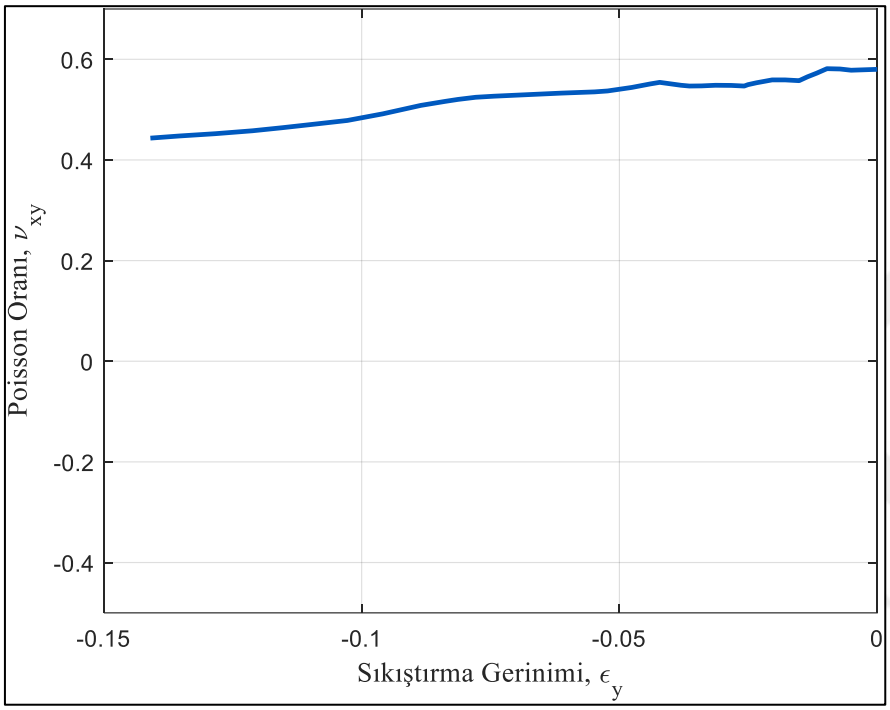


Şekil 6.53. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca enerji sönümleme eğrisi



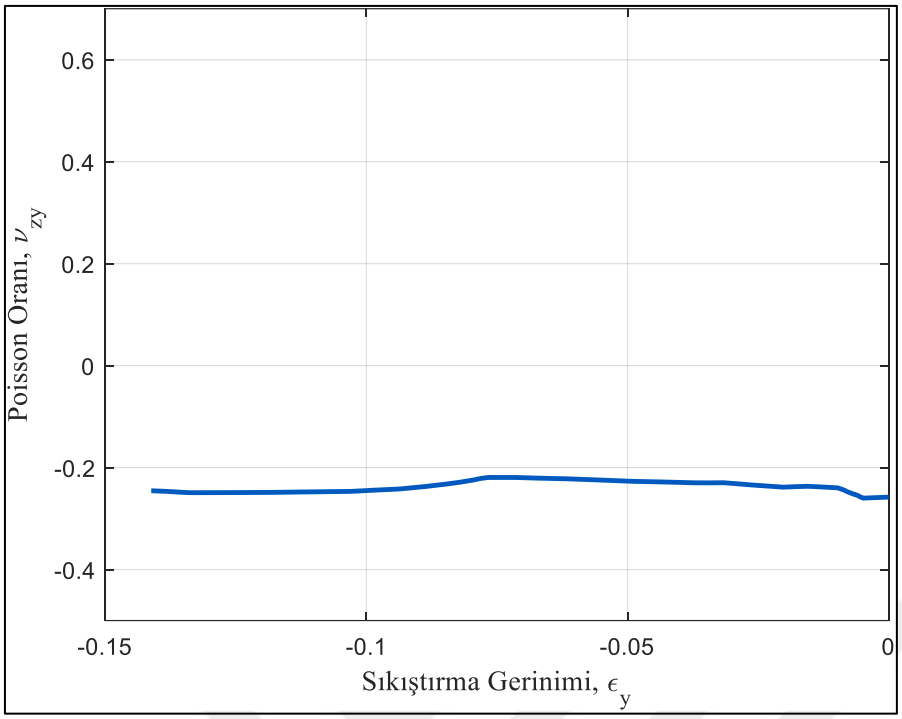
Şekil 6.54. İkinci gradyan hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme eğrisi

Hibrit kafes yapısı içerisinde var olan öksetik kafes yapısı birim hücrede negatif Poisson oranına sahip olurken kafes sistemi içerinde de negatif Poisson oranının elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Bunun için kafes yapısındaki şekil değişimleri ve Poisson oranı Eş. 6.14 ile hesaplanmıştır. Gradyan yapı için Poisson oranları Şekil 6.55 ve Şekil 6.56'da verilmiştir.



Şekil 6.55. İkinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca x yönlü Poisson oranının değişimi

Şekil 6.55 ve Şekil 6.56 incelendiğinde deformasyon şeklinde görüldüğü gibi yapı sıkıştırıldıkça z yönünde negatif Poisson oranına sahip olmasındır. Bu davranışın öksetik yapıdaki yatay olarak konumlandırılan içe bükümlü kirişlerden meydana geldiği açıktır. Fakat düzey konumdaki içe bükümlü kirişlerin düşün deformasyonda bir öksetik özellik sağlamadığı görülmüştür.

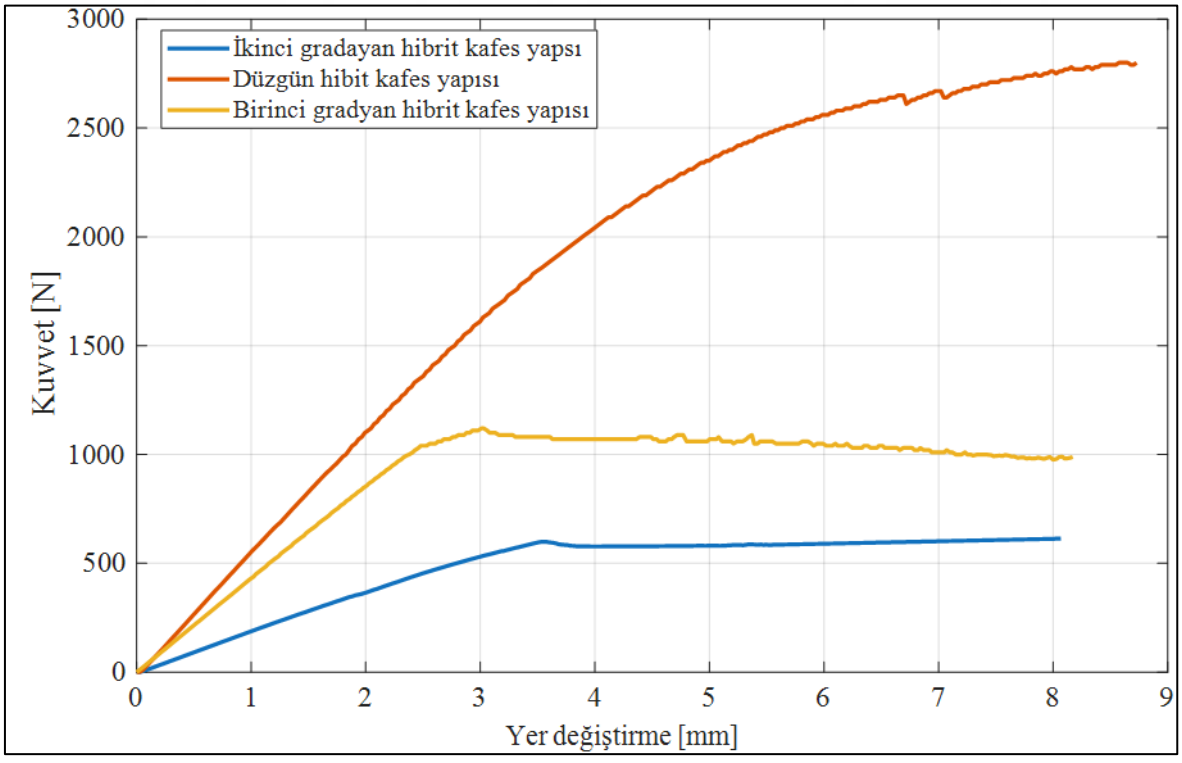


Şekil 6.56. İkinci hibrit kafes yapısının düşey sıkıştırma boyunca z yönlü Poisson oranının değişimi

7. SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

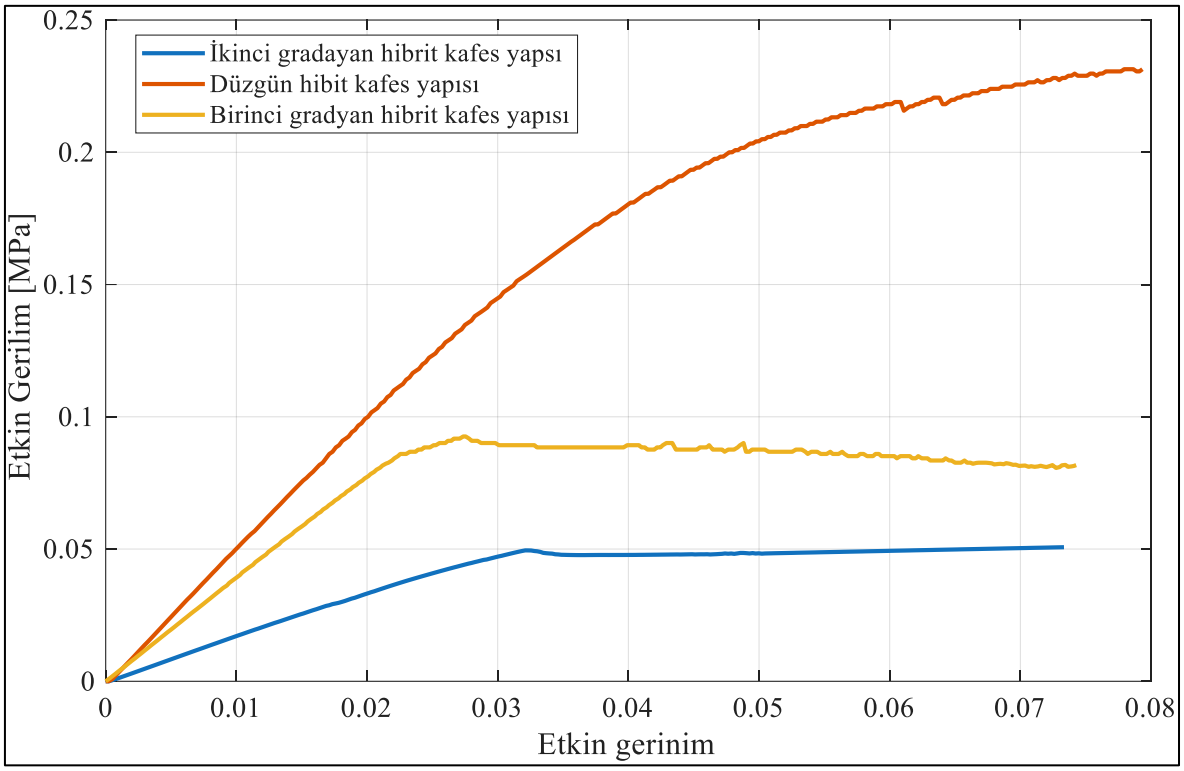
Bu bölümde oluşturulan düzgün kafes sistemi temel alınarak tasarlana iki gradyan yapı ile karşılaştırılmaları sunulmuştur. Yapılar arasında karşılaştırmalar yapılırken değerlendirmelerin sadece yapısal geometrik farklardan oluştuğunu görmek için üç kafes sistemi de ortak birim yer değiştirme değerinde eksenel yük değerleri, etkin gerilim gerinim değerleri ve enerji sönümleme değerleri karşılaştırılmıştır.

Öncelikli olarak kafes yapılarının kuvvet- yer değiştirme eğrileri incelenmiştir. Üç yapıya ait kuvvet- yer değiştirme eğrisi Şekil 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.1'e göre düzenli yapı bariz bir şekilde gradyan hibrit kafes yapılarına göre daha çok eksenel yöndeki yükü kaldırmaktadır. Bu durum yapının tamamen simetrik ve düzenli bir dağılım içinde olmasından kaynaklıdır. Öte yandan gradyan kafes sistemlerinde, sadece gövde merkezli kübik yapının katmanlarındaki değiştirilmesi bütün yapının gradyan hale getirilmesinde daha fazla eksenel yükü kaldırdığı görülmüştür. Burada gövde merkezli kübik yapının eksenel yükü taşımak için olumlu etkisi olmuştur.



Şekil 7.1. Hibrit kafes yapılarının kuvvet- yer değişimi

Hibrit yapılar için gözenekli yapısında meydana gelen etkin gerilme- gerinim değerleri karşılaştırılması yapılmıştır. Bu değerler hibrit yapıları alan ve birim zamanda yer değişmesine bağlı hesaplanması sebebiyle kuvvet- yer değiştirme eğrilerinden farklı bir davranış beklenmemektedir. Bu durum üç kafes yapısının boyut olarak aynı olması ve aynı sıkıştırma koşulu uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Fakat aynı sıkıştırma koşulu uygulansa bir her hücre aynı birim şekil değişimi elde edilemez bu durumda geometrik farklılığın bir kanıtıdır. Üç yapı için hesaplanan gerilme-gerinim eğrisi Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Hibrit kafes yapılarının etkin gerilim- gerinim karşılaştırılması

Kafes yapıların gözenekli yapılarından kaynaklı oluşturdukları global gerilme değerleri geleneksel yapılara göre oldukça küçüktür. Bu durum, yapıların boşluklu olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat bu çalışmada ayrıca sonlu elemanlar analizleri ile yük taşıyan kirişlerin maksimum gerilme değerler karşılaştırılmıştır. Geometrik olarak farklı olan bu yapılar her zaman eşit gerinim değerine ulaşmamıştır. Özellikle düzenli kafes yapısının yük taşıyan kirişlerdeki maksimum gerilme değerinde gradyan kafes sistemlerine göre daha düşük bir gerinime sahip olmuştur. Bu sebepten dolayı kafes sistemlerinin aynı deformasyon

bölgelerine gelecek şekilde birbirlerine yakın gerinim değerlerinde, kirişlerin maksimum gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Bu değerler Çizelge 7.1'de sunulmuştur.

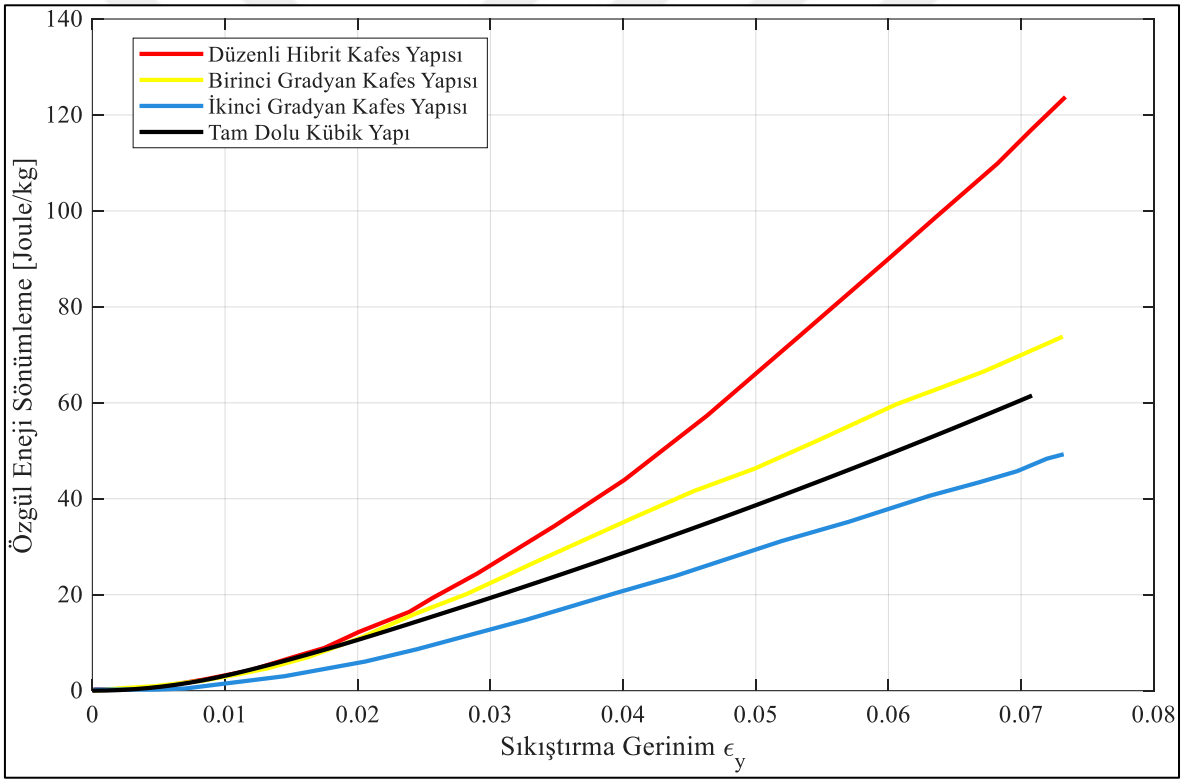
Çizelge 7.1. Kafes yapılarına ait taşıyıcı kiriş gerilim ve gerinim değerleri

Deformasyon	Gerinim	Gerilim [MPa]	
İlk Deformasyon	0,001	20,02	Düzenli Hibrit Kafes Yapısı
Orta Deformasyon	0,047	46,11	
İleri Deformasyon	0,098	55,87	
İlk Deformasyon	0,001	17,72	Birinci Gradyan Hibrit Kafes Yapısı
Orta Deformasyon	0,039	44,55	
İleri Deformasyon	0,135	63,17	
İlk Deformasyon	0,001	19,07	İkinci Gradyan Hibrit Kafes Yapısı
Orta Deformasyon	0,038	42,65	
İleri Deformasyon	0,188	53,78	

Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi üç yapının aynı deformasyon bölgelerindeki kirişlerinin oluşturduğu gerilim karşılaştırmasında, global etkilerde düzenli hibrit yapısı diğer iki yapıya göre daha etkin performans gösterse bile ileri deformasyon bölgesinde birinci gradyan hibrit yapının kirişlerinde oluşan maksimum gerilim değeri diğer iki yapıya göre daha yüksektir. Bu durum, yapının gradyan olarak modellenmesinin lokal deformasyon modlarını daha kritik hâle getirerek belirli bölgelerde gerilme piklerini artırabileceğini göstermektedir.

Tez çalışmasında tasarlanan üç hibrit kafes yapısının eksenel yükleme altındaki enerji sönümleme değerleri hesaplanmıştır. Enerji sönümleme değerinin bir yapıdaki toplam enerji sönümleme kapasitesini göstermektedir. Fakat özgül enerji sönümleme değeri yapının kütlesi başına düşen enerji sönümleme kapasitesi göstermektedir. Özgül enerji sönümleme değeri farklı kütleye sahip yapıların kıyaslamasında daha adil bir yaklaşımdır. Bunun sebebi ise iç hibrit kafes yapısının da farklı kütlere sahip olmasıdır. Ayrıca tasarım projelerinde toplam enerji sönümleme değerinden ziyade birim hücresinin kütlesi başına elde ettiği enerji sönümleme değer göz önüne alınarak yapılır. Ek olarak hafif tasarımların performansının ölçülmesi içinde toplam enerji sönümleme değerine göre daha yapıları birbirinden ayırma da daha uygulanabilirdir. Bu sebeplerden dolayı, üç yapıya ait özgül enerji sönümleme değerleri hesaplanmış ve Şekil 7.3'te verilmiştir.

Şekil 7.3'te görüldüğü gibi düzenli hibrit kafes yapısı bütün sıkıştırma oranlarında diğer iki yapıya kıyasla belirgin biçimde daha yüksek özgül enerji sönümleme kapasitesi göstermiştir. Özellikler %4'lük sıkıştırma oranlarından sonra eğrinin eğiminin artması düzenli yapıdaki yük aktarımının daha düzgün gerçekleşmesin ve öksetik yapıdaki dönme ve eğilme mekanizmasının daha geç gerçekleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Birinci gradyan yapı, başlangıçta düzenli yapıya yakın bir davranış gösterse de gerinim arttıkça enerji biriktirme kapasitesi daha sınırlı kalmış; bu durum, değişen kiriş yarıçaplarının yükün kademeli olarak ani sertleşmeyi geciktirmesiyle açıklanabilir. İkinci gradyan yapının en düşük özgül enerji değerlerine sahip olması ise, özellikle daha ince kirişlerin erken lokal burkulmaya maruz kalması ve diğer katmanlara etkin enerji transferini kısıtlamasıyla ilişkilidir.

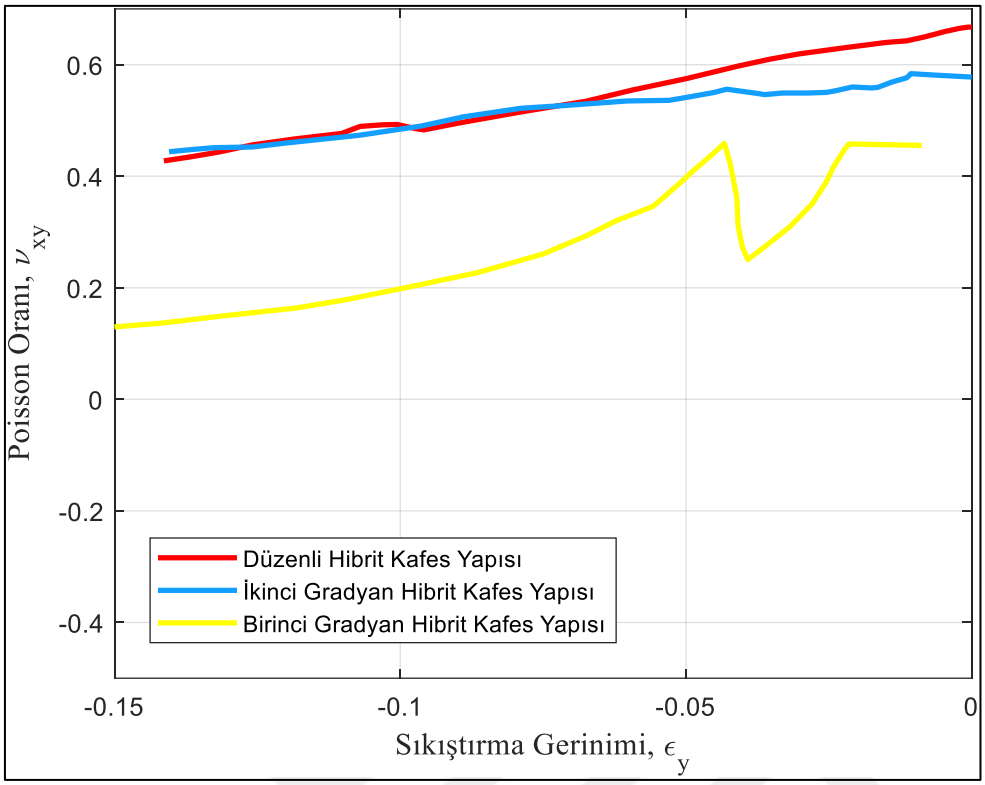


Şekil 7.3. Hibrit yapıların düşey sıkıştırma boyunca özgül enerji sönümleme değerleri

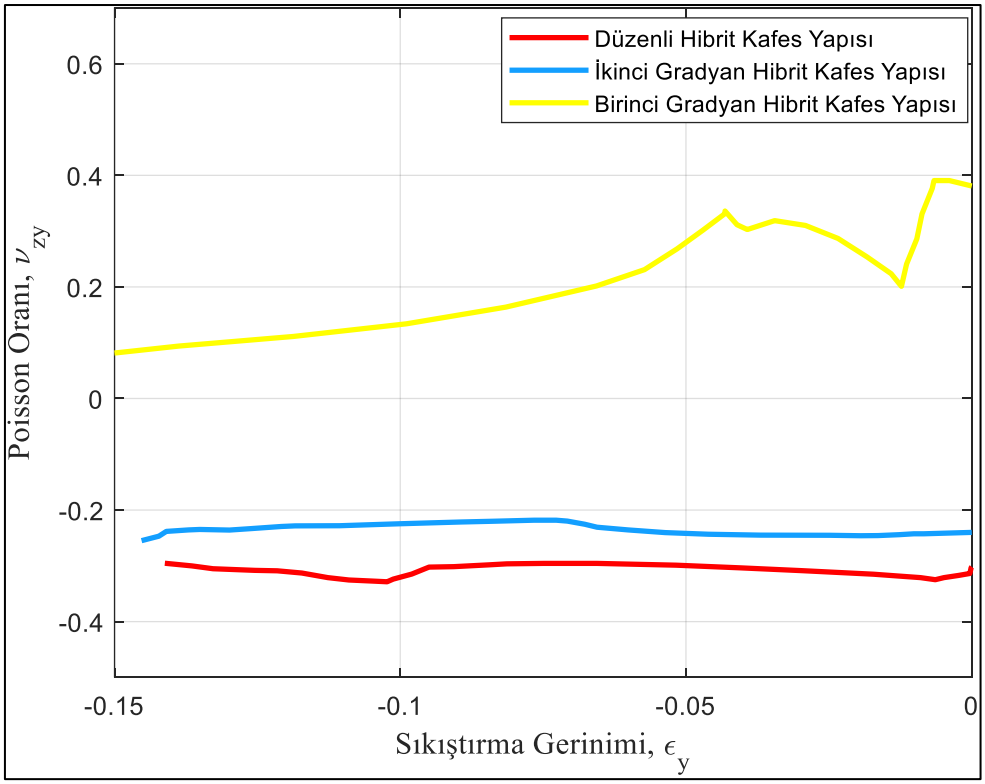
Çizelge 7.2. Kafes yapıları kütle karşılaştırılması

Kafes Yapısı	Kütle (g)
Tam Dolu Kafes Yapısı	1637,0
Düzenli Hibrit Kafes Yapısı	117,0
Birinci Gradyan Hibirt Kafes Yapısı	97,4
İkinci Gradyan Hibrit Kafes Yapısı	77,0

Çizelge 7.2'de verilen kütle değerleri ile Şekil 7.3'te sunulan özgül enerji sönümleme eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, kafes yapıları arasındaki performans farkları açık biçimde görülmektedir. Tam dolu kübik yapı, en yüksek kütleye sahip olmasına rağmen özgül enerji sönümleme açısından hibrit kafes yapıların gerisinde kalmaktadır. Çizelge 7.2'de görüldüğü üzere düzenli hibrit kafes yapısı önemli ölçüde daha düşük kütleye sahip olmasına rağmen, tüm sıkıştırma gerinimi aralığında en yüksek özgül enerji sönümleme değerlerini sunmaktadır. Birinci gradyan hibrit kafes yapısı, kütle açısından düzenli hibrit yapıya göre avantaj sağlasa da enerji sönümleme performansında kademeli bir azalma göstermektedir. Çizelge 7.2 ve Şekil 7.3 birlikte incelendiğinde, en düşük kütleye sahip olan ikinci gradyan hibrit kafes yapısının hafiflik avantajına karşın enerji sönümleme verimliliğinin daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, kütle azaltımı ile enerji sönümleme kapasitesi arasındaki dengenin, hücre düzeni ve gradyan tasarımına doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında karşılaştırılan üç farklı kafes yapısının Poisson oranı tepkileri incelendiğinde, düzenli hibrit kafes yapısı ile ikinci gradyan kafes yapısının yükleme altında negatif Poisson oranı sergilediği, buna karşın birinci gradyan kafes yapısının öksetik bir davranış göstermediği belirlenmiştir. Düzenli hibrit yapı ve ikinci gradyan yapıda gözlenen bu davranış, hücre geometrisinin yükleme yönüne bağlı olarak yanal genişlemeye izin veren re-entrant karakterinden kaynaklanmaktadır. Birinci gradyan kafes yapısında ise katmanlar arası geometrik geçişin bu mekanizmayı kısıtladığı ve yanal deformasyonun baskılandığı görülmüştür. Bu durum, gradyan tasarımın yalnızca rijitlik veya taşıma kapasitesi üzerinde değil, aynı zamanda yapının kinematik deformasyon mekanizması ve Poisson oranı tepkisi üzerinde de belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, negatif Poisson oranı hedeflenen uygulamalarda gradyan dağılımının dikkatli biçimde tasarlanması gerektiğini ve her gradyan konfigürasyonunun otomatik olarak öksetik davranış sağlamadığını açıkça göstermektedir.



Şekil 7.4. Hibrit kafes yapılarının düşey sıkıştırma boyunca Poisson Oranı (υ_{xy}) karşılaştırılması



Şekil 7.5. Hibrit kafes yapılarının düşey sıkıştırma boyunca Poisson Oranı (υ_{zy}) karşılaştırılması

Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te sunulan Poisson oranı–sıkıştırma gerinimi eğrileri, düzenli hibrit kafes yapısı, biringi gradyan kafes yapısının ve ikinci gradyan hibrit kafes yapısının yönsel deformasyon davranışları arasındaki farkları daha ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. υ_{zy} bileşeni incelendiğinde, düzneli hibrit kafes yapısı ile ikinci gradyan hibrit yapının tüm yükleme aralığı boyunca negatif Poisson oranı sergilediği görülmekle birlikte, düzenli hibrit kafes yapısının daha düşük (daha negatif) Poisson oranı değerlerine ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, düzenli yapıdaki hücre geometrisinin yükleme altında daha belirgin bir yanal genişleme mekanizması oluşturduğunu ve öksetik etkinin bu yapıda daha baskın olduğunu göstermektedir. İkinci gradyan hibrit kafes yapısında ise negatif Poisson oranı davranışı korunmakla birlikte, değerlerin daha sınırlı bir aralıkta değiştiği ve yükleme ilerledikçe daha dengeli bir seyir izlediği gözlenmiştir. Birinci hibrit kafes yapısının ise yükleme boyunca pozitif Poisson oranı özelliği göstermiştir. υ_{xy} bileşenine ait sonuçlar değerlendirildiğinde, her üç yapının pozitif Poisson oranı sergilediği ve sıkıştırma gerinimi arttıkça bu değerin kademeli olarak yükseldiği görülmektedir. Bununla birlikte, düzenli hibrit kafes yapısında Poisson oranının daha hızlı arttığı, birinci ve ikinci gradyan yapıya kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu farklılık, gradyan dağılımının hücrelerin yanal deformasyon serbestliğini kısmen sınırladığını ve deformasyonun daha kontrollü bir şekilde ilerlemesine neden olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, düzenli hibrit kafes yapısının daha güçlü bir öksetik tepki sunarken, ikinci gradyan hibrit kafes yapısının yönsel deformasyon açısından daha dengeli ve kararlı bir davranış sergilediği söylenebilir. Bu bulgu, öksetik özelliklerin yalnızca varlığı kadar, büyüklüğü ve yükleme boyunca sürekliliğinin de tasarım açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, düzenli hibrit kafes yapısı temel alınarak tasarlanan iki farklı gradyan hibrit kafes sisteminin eksenel yükleme altındaki mekanik davranışları nümerik olarak incelenmiştir ve yapılar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasında yapılan tüm hibrit kafes yapıları etkisinin sadece geometriden kaynaklı olarak meydana geldiğinin değerlendirilebilmesi için tüm yapılarda kullanılan yükleme koşulları ve sınır değerler aynı tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, tüm yapılar için ortak yer değiştirme seviyesinde yapılmıştır. Böylece gövde merkezli kübik yapı ve öksetik hücrelerin farklı katmanlarda değiştirilmesinin global kapasitesine, gerilme-gerinim dağılımına ve enerji sönümleme performansına etkileri ortaya konmuştur.

Yapılan analizler gradyan modellerin yapısal davranış üzerinde çift yönlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Uygun şekilde kurgulanan bir gradyan dağılımı yük taşıma kapasitesini ve deformasyon modlarını olumlu yönde değiştirebilirken, aşırı gradyan veya ince kesitli kirişlerin kullanılması lokal burkulmayı artırarak performansı düşürebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, hibrit kafes yapıların optimum tasarımının hücre geometrisinin ve kiriş yarı çaplarının katmanlar arası dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, enerji sönümleme performansı yüksek, hafif ve kontrollü deformasyon davranışı sergileyen yapısal elemanların tasarımında hibrit ve gradyan kafes sistemlerinin önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme eğrileri, titreşim sönüm oranlarını doğrudan tanımlayan parametreler olmamakla birlikte, yapının uygulanan yükler altında mekanik enerjiyi ne ölçüde tüketebildiğine dair önemli bilgiler sunmuştur. Yükleme sürecinde belirgin bir histerik davranış sergileyen kafes yapıları, titreşim etkisi altında her bir periyot boyunca daha fazla enerji kaybın uğrayacağı ve durumun yapısal sönüm kapasitesini arttıracak yönde olduğu değerlendirilmiştir. Bu çerçevede yüksek özgül enerji sönümleme değerlerine sahip yapıların, titreşim kaynaklı enerjinin yapısal bünyede dağılması ve etkisinin azaltılması açısından avantajlı olduğu söylenebilir. Bunula birlikte, titreşim sönüm oranlarının sayısal olarak belirlenmesi için modal analizlerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Tez çalışmasında diğer önemli sonuç ise hibrit kafes yapısının temelini oluşturan birim hibrit kafes yapısı için Gibson-Ashby gözenek metodu kullanılarak yapılan teorik hesaplama ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasından elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar temel alınarak Gibson-Ashby modelindeki C_1 katsayı tekrar hesaplanmıştır. C_1 kat sayısı geometri ve üretime koşullarına göre hesaplanan bir katsayıdır. Bu değerin değişimi PLA malzemesi ile ergiterek yığma modelleme yöntemiyle üretilen kafes yapıları için referans oluşturmaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, Selektif Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS) veya Stereolitografi (Stereolithography – SLA) gibi alternatif eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması, farklı malzeme türlerinin denenmesi ve çok eksenli yükleme (multiaxial loading) senaryolarının incelenmesiyle sonuçların daha uygulanabilir seviyeye getirilmesi ve hibrit kafes yapıların davranışlarının daha kapsamlı biçimde ortaya konması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Altamimi, S., Lee, D. W., Barsoum, I., Rowshan, R., Jasiuk, I. M. ve Abu Al-Rub, R. K. (2022). On stiffness, strength, anisotropy, and buckling of 30 strut-based lattices with cubic crystal structures. *Advanced Engineering Materials*, 24(7), 2101379.

Andrew, J. J., Schneider, J., Ubaid, J., Velmurugan, R., Gupta, N. K. ve Kumar, S. (2021). Energy absorption characteristics of additively manufactured plate-lattices under low-velocity impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 149, 103768.

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.

Askari, A. ve Jamalzadeh, M. (2024). A review of structural diversity design and optimization for lattice metamaterials. *AIP Advances*, 14(10), 100701.

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, 105735.

Bashtani, M., Etemadi, E., Hu, H. ve Moradi, M. (2024). Auxetic lattice structures consisting of an enhanced trigram frame unit cell with superior stiffness. *Composite Structures*, 338, 118100.

Benedetti, M., du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N. ve Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 144, 100606.

Berthel, J., Taggart-Scarff, J., Yu, J., McWilliams, B., Panat, R. ve Beuth, J. (2025). AlSi10Mg plate-lattice structures fabricated by laser powder bed fusion exhibiting high specific energy absorption. *Materials & Design*, 257, 114395.

Boldrin, L., Hummel, S., Scarpa, F., Di Maio, D., Lira, C., Ruzzene, M., Remillat, C. D. L., Lim, T. C., Rajasekaran, R. ve Patsias, S. (2016). Dynamic behaviour of auxetic gradient composite hexagonal honeycombs. *Composite Structures*, 149, 114-124.

Chen, L. (2017). *Triangular Lattice of Arbitrary Class of 2D Elasticity*. Doktora tezi, Université de Nantes École Doctorale SPIGA, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Nantes, 1-128.

Cheng, Z., Zhang, X., Yan, K., Zhao, Y. ve Cui, J. (2024). An improved BCC lattice structure for vibration isolation in extreme environment. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(11), 1-15.

Chibinyani, M., Cephas Dzogbewu, T., Maringa, M. ve Muiruri, A. (2023, 15 December). *A review of the types and tessellation of lattice structures, their effectiveness and limitations in mimicking natural cellular structures*. MATEC Web of Conferences, South Africa, 388, 06008.

Choudhry, N. K., Panda, B. ve Dixit, U. S. (2023). Energy absorption characteristics of fused deposition modeling 3D printed auxetic re-entrant structures: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(21), 8981-8999.

Coluccia, A., Meyer, G., Liseni, S., Mittelstedt, C. ve De Pasquale, G. (2025). Functionally graded lattice structures for energy absorption: Numerical analysis and experimental validation. *Composite Structures*, 360, 119013.

Daynes, S. ve Feih, S. (2025). Functionally graded lattice structures with tailored stiffness and energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 285, 109861.

Deshpande, V. S., Ashby, M. F. ve Fleck, N. A. (2001). Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6), 1035-1040.

Fevzi, D. ve Bolat, Ç. (2022). *Farklı Tip Negatif Poisson Oranına Sahip (auxetic) Kirişlerin Titreşim Esaslı Enerji Hasadı Performanslarının İncelenmesi.* Yüksek lisans tezi. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bolu, 14-45.

Geng, X., Ma, L., Liu, C., Zhao, C. ve Yue, Z. F. (2018). A FEM study on mechanical behavior of cellular lattice materials based on combined elements. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 188-198.

Ghaemi Khiavi, S., Mohammad Sadeghi, B. ve Divandari, M. (2022). Effect of topology on strength and energy absorption of PA12 non-auxetic strut-based lattice structures. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 1595-1613.

Ghahramanzadeh Asl, H., Altıntaş Kahriman, E. ve Karaman, D. (2023). Numerical investigation of the effective mechanical properties of Octet Truss lattice structures with different strut geometry. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 9(4), 133-145.

Gibson, L. J. ve Ashby, M. F. (1982). Mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 43-59.

Gibson, L. J. ve Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties.* (2. baskı). Cambridge: Cambridge University Press, 100-532.

Glaesener, R. N., Lestringant, C., Telgen, B. ve Kochmann, D. M. (2019). Continuum models for stretching- and bending-dominated periodic trusses undergoing finite deformations. *International Journal of Solids and Structures*, 171, 117-134.

Hu, Q., Lu, G. ve Tse, K. M. (2024). Tensile mechanical behaviors of re-entrant and Kelvin cell lattice structures. *JOM*, 76(1), 387-396.

Kamranfard, M. R., Darijani, H., Rokhgireh, H. ve Khademzadeh, S. (2023). Analysis and optimization of strut-based lattice structures by simplified finite element method. *Acta Mechanica*, 234(4), 1381-1408.

Khan, N. ve Riccio, A. (2024). A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions. *Progress in Aerospace Sciences*, 148, 101021.

Labeas, G. N. ve Sunaric, M. M. (2010). Investigation on the static response and failure process of metallic open lattice cellular structures. *Strain*, 46(2), 195-204.

Lai, A., Liu, P., Dai, T. ve Fu, G. (2025). Tunable failure mode of multi-scale hybrid lattice structures. *Vacuum*, 239, 114387.

Lakes, R. (1987). Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235(4792), 1038-1040.

Li, B., Liu, H., Zhang, Q., Yang, X. ve Yang, J. (2022). Crushing behavior and energy absorption of a bio-inspired bi-directional corrugated lattice under quasi-static compression load. *Composite Structures*, 286, 115315.

Li, C., Shen, H. S. ve Wang, H. (2020). Postbuckling behavior of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core. *Composite Structures*, 237, 111894.

Li, C., Shen, H. S. ve Wang, H. (2021). Full-scale finite element modeling and nonlinear bending analysis of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(7), 3113-3138.

Li, L., Yang, F., Zhang, S., Guo, Z., Wang, L., Ren, X. ve Zhao, M. (2023). A novel hybrid auxetic honeycomb with enhanced load-bearing and energy absorption properties. *Engineering Structures*, 289, 116335.

Li, L., Guo, Z., Yang, F., Li, P., Zhao, M. ve Zhong, Z. (2024). Additively manufactured acoustic-mechanical multifunctional hybrid lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 269, 109071.

Li, N., Pang, S., Chen, S., Liu, Y., Aiyiti, W. ve Chen, Z. (2024). Design and application of hybrid lattice metamaterial structures with high energy absorption and compressive resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 7100-7112.

Li, T., Jarrar, F., Abu Al-Rub, R. ve Cantwell, W. (2021). Additive manufactured semi-plate lattice materials with high stiffness, strength and toughness. *International Journal of Solids and Structures*, 230-231, 111153.

Li, Y., Jiang, D., Zhao, R., Wang, X., Wang, L. ve Zhang, L. C. (2024). High mechanical performance of lattice structures fabricated by additive manufacturing. *Metals*, 14(10), 1165.

Lin, Y., Wang, X., Liang, Z., Li, D., Liu, T., Liao, W. ve Zhang, C. (2025). Optimization design of multi-scale TPMS lattices based on geometric continuity fusion and strain energy driven. *Composite Structures*, 354, 118759.

Lotfi, B. ve Sundén, B. (2023). A novel trussed fin-and-elliptical tube heat exchanger with periodic cellular lattice structures. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 33(3), 1076-1115.

Ma, J., Zhang, H., Lee, T. U., Lu, H., Xie, Y. M. ve Ha, N. S. (2025). Auxetic behavior and energy absorption characteristics of a lattice structure inspired by deep-sea sponge. *Composite Structures*, 354, 118835.

Maconachie, T., Tino, R., Lozanovski, B., Watson, M., Jones, A., Pandelidi, C., Alghamdi A., Almalki A., Downing D., Brandt, M. ve Leary, M. (2020). The compressive behaviour of ABS gyroid lattice structures manufactured by fused deposition modelling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(11-12), 4449-4467.

Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D. ve Hague, R. J. M. (2016). A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 670, 264-274.

Monkova, K., Vasina, M., Zaludek, M., Monka, P. P. ve Tkac, J. (2021). Mechanical vibration damping and compression properties of a lattice structure. *Materials*, 14(6), 1502.

Musenich, L., Stagni, A. ve Libonati, F. (2023). Design of hierarchical lattice structures attainable by additive manufacturing techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1275(1), 012003.

Nam, R., Jakubinek, M., Niknam, H., Rahmat, M., Ashrafi, B. ve Naguib, H. E. (2023). 3D printed octet plate-lattices for tunable energy absorption. *Materials & Design*, 228, 111835.

Nečemer, B., Glodež, S., Novak, N. ve Kramberger, J. (2020). Numerical modelling of a chiral auxetic cellular structure under multiaxial loading conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 102514.

Noronha, J., Dash, J., Leary, M., Watson, M., Qian, M., Kyriakou, E. ve Brandt, M. (2023). Additively manufactured functionally graded lattices: Design, mechanical response, deformation behavior, applications, and insights. *JOM*, 75(12), 5729-5754.

Omidi, M. ve St-Pierre, L. (2022). Mechanical properties of semi-regular lattices. *Materials & Design*, 213, 110324.

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

Rahimi, S. ve Asghari, M. (2025). Design and evaluation of two proposed hybrid FCC-BCC lattice structures for enhanced mechanical performance. *Heliyon*, 11(1), e40911.

Raj, R., Jiyalal Prajapati, M., Tsai, J. T., Kumar, A. ve Jeng, J. Y. (2024). Design and additive manufacturing of novel hybrid lattice metamaterial for enhanced energy absorption and structural stability. *Materials & Design*, 245, 113268.

Rajpal, R., Lijesh K.P. ve Gangadharan, K. V. (2018). Parametric studies on bending stiffness and damping ratio of sandwich structures. *Additive Manufacturing*, 22, 583-591.

Ráž, K., Chval, Z. ve Pereira, M. (2024). Lattice structures—mechanical description with respect to additive manufacturing. *Materials*, 17(21), 5298.

Sahariah, B. J., Namdeo, A. ve Khanikar, P. (2022). Composite-inspired multilattice metamaterial structure: An auxetic lattice design with improved strength and energy absorption. *Materials Today Communications*, 30, 103159.

Salem, H., Abouchadi, H. ve Elbikri, K. (2022). PLA mechanical performance before and after 3D printing. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(3), 340.

Shen, J., Liu, K., Zeng, Q., Ge, J., Dong, Z. ve Liang, J. (2021). Design and mechanical property studies of 3D re-entrant lattice auxetic structure. *Aerospace Science and Technology*, 118, 106998.

Shen, J., Zeng, Q., Wang, J., Ge, J., Gao, F. ve Liang, J. (2023). Study of mechanical properties of a new 3D re-entrant lattice auxetic structure under bending. *Advanced Engineering Materials*, 25(14), 2201509.

Shiyin, X., Xiuchang, H. ve Hongxing, H. (2015). A study on the isolation performance of trichiral lattices with gradient geometry. *Journal of Vibration and Control*, 21(16), 3465-3475.

Spadoni, A. ve Ruzzene, M. (2007). Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(9), 1755-1773.

Sun, Z., Gong, Y., Bian, Z., Zhang, J., Zhao, L. ve Hu, N. (2024). Mechanical properties of bionic lattice and its hybrid structures based on the microstructural design of pomelo peel. *Thin-Walled Structures*, 198, 111715.

Syam, W. P., Jianwei, W., Zhao, B., Maskery, I., Elmadih, W. ve Leach, R. (2018). Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*, 52, 494-506.

Syrlybayev, D., Yankin, A., Perveen, A. ve Talamona, D. (2025). Effect of topology on the mechanical properties and energy absorption of annealed lightweight SLM AlSi10Mg lattice structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 8(1), 100345.

Széles, L., Horváth, R. ve Réger, M. (2024). Parameter-independent deformation behaviour of diagonally reinforced doubly re-entrant honeycomb. *Polymers*, 16(21), 3082.

Thant, A. M., Ma, J. ve Jahan, M. P. (2025). Enhancing compressive properties of SLS-printed Nylon lattice structures by hybridization of common unit cell structures. *Manufacturing Letters*, 44, 1076-1087.

Usta, F. (2021). *Deformation Behavior of Thin Walled Structures Filled with Auxetic and Non-Auxetic Core Materials.* Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-187.

Vafaeefar, M., Moerman, K. M. ve Vaughan, T. J. (2024). Experimental and computational analysis of energy absorption characteristics of three biomimetic lattice structures under compression. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 151(1), 106328.

Wang, C., Liu, X., Yue, Y., Huang, J., Huang, X. ve Liu, B. (2021). Study on vibration damping mechanism of shoe sole with alternating lattice structure using vibration level difference. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 6647573.

Wang, H., Shao, J., Zhang, W., Yan, Z., Huang, Z. ve Liang, X. (2023). Three-point bending response and energy absorption of novel sandwich beams with combined re-entrant double-arrow auxetic honeycomb cores. *Composite Structures*, 326, 117606.

Wang, J., Liu, F., Tang, L., Liu, F., Jiang, W., He, W. ve Lin, X. (2025). Deformation and energy absorption studies on additive manufactured Ti–6Al–4V alloy with gradient lattice structures. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 2620-2630.

Wang, S., Wang, J., Xu, Y., Zhang, W. ve Zhu, J. (2020). Compressive behavior and energy absorption of polymeric lattice structures made by additive manufacturing. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 15(2), 319-327.

Xiao, L., Song, W., Wang, C., Tang, H., Fan, Q., Liu, N. ve Wang, J. (2017). Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 75-89.

Xiao, R., Li, X., Jia, H., Surjadi, J. U., Li, J., Lin, W., Gao, L., Chirarattananon, P. ve Lu, Y. (2021). 3D printing of dual phase-strengthened microlattices for lightweight micro aerial vehicles. *Materials & Design*, 206, 109767.

Xie, B., Liu, K., Tao, J., Li, K., Wang, X. ve Guo, C. (2025). Compression failure modes and energy absorption properties of 3D printed short carbon fiber reinforced lattice structures. *Engineering Failure Analysis*, 182, 109984.

Xie, Z., Cheng, J., Liu, L., Ren, Y., Li, W., Zeng, F., Zhang, Q. ve Chen, W. (2025). Comparison of deformation characteristics and energy absorption of additively manufactured superalloys lattice structures under quasi-static compression. *Materials & Design*, 260, 115239.

Xu, Z., Razavi, S. M. J. ve Ayatollahi, M. R. (2023). Functionally graded lattice structures: Fabrication methods, mechanical properties, failure mechanisms and applications. In *Comprehensive Structural Integrity*. Norway: Elsevier, 433-466

Xue, X., Gao, J., Zheng, C., Li, Z., Liao, J. ve Zhang, M. (2025). Energy absorption and vibration characteristics of metal/polymer composited pyramidal lattice cylinder structure. *Structures*, 76, 108878.

Yang, L., Harrysson, O., West, H. ve Cormier, D. (2012). Modeling of uniaxial compression in a 3D periodic re-entrant lattice structure. *Journal of Materials Science*, 47, 5958-5968.

Yang, L., Harrysson, O., West, H. ve Cormier, D. (2015). Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 69, 475-490.

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, 116397.

Yu, Z., Savinov, R., Matura, M., Zhang, P. ve Shi, J. (2025). Current research status on advanced lattice structures for impact and energy absorption applications: A systematic review. *Thin-Walled Structures*, 215, 113490.

Yuran, A. F., Yıldırım, A. ve Yavuz, İ. (2024). Kafes yapıların üretim yöntemleri. (1. Baskı). *Makine mühendisliği çalışmaları* içinde. Ankara: Yaz Yayınları, 15-43.

Zadpoor, A. A. (2019). Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials. *Acta Biomaterialia*, 85, 41-59.

Zhang, J., Huang, H., Liu, G., Zong, H. ve Zhang, C. (2021). Stiffness and energy absorption of additive manufactured hybrid lattice structures. *Virtual and Physical Prototyping*, 16(4), 428-443.

Zhao, M., Zhang, D. Z., Li, Z., Zhang, T., Zhou, H. ve Ren, Z. (2022). Design, mechanical properties, and optimization of BCC lattice structures with taper struts. *Composite Structures*, 295, 115830.



Gazili olmak ayrıcalıktır