

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖKZETİK (AUXETİK) ÇOK HÜCRELİ KİRİŞ YAPILARIN
EĞİLME DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Mehmet Fatih KAHRAMAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

OCAK 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖKZETİK (AUXETİK) ÇOK HÜCRELİ KİRİŞ YAPILARIN
EĞİLME DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ

Mehmet Fatih KAHRAMAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan GENEL

OCAK 2024

Mehmet Fatih KAHRAMAN tarafından hazırlanan “Ökzetik (Auxetic) Çok Hücreli Kiriş Yapıların Eğilme Davranışı” adlı tez çalışması 08.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyesi :

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi :

Bartın Üniversitesi

Jüri Üyesi :

Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi :

Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ÖKZETİK (AUXETİC) ÇOK HÜCRELİ KİRİŞ YAPILARIN EĞİLME DAVRANIŞI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(08/01/2024)

(imza)

Mehmet Fatih KAHRAMAN





Eşime, çocuklarıma ve Aileme



TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecindeki akademik çalışmalarına verdiği çok kıymetli desteklerinden ötürü, hakkını ödeyemeceğim çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Kenan GENEL'e şükranlarımı ve minnettarlığımı sunarım. Doktora tez izleme komitesinde bulunan ve doktora sürecinde önüme çıkan engelleri aşmama yardımcı olan ve özellikle deney parçalarının üretiminde bizleri destekleyen Doç. Dr. Sedat İRİÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Zeki ÖZCAN hocalarıma ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sürecinde bana verdiği sonsuz destekten ötürü gönlümün sultanı, hayat arkadaşım sevgili eşime ve bu süreçte dünyaya gelen sıkıntılı günlerde beni güldüren canım kızım ve oğluma ayrıca hayatım boyunca destek ve yardımlarını her an hissettiğim babam, annem ve kardeşlerime en kalbi şükranlarımı sunarım.

Mesleki hayatım boyunca maddi ve manevi bütün desteklerini sunan Prof. Dr. Sabri ÖZTÜRK ve Doç. Dr. Ömer Kadir Morgül hocalarıma ayrıca teşekkür eder minnettarlığımı sunarım. Benimle birlikte kader arkadaşlığı yaptığım zor zamanlarımda bana dert ortağı olan Arş. Gör. Habibullah BİLGE'ye göstermiş olduğu destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreçte hem akademik hem de manevi desteklerini sunan Arş. Gör. Mustafa Said OKUTAN ve Arş. Gör. Muhammed Ömer İBİŞ'e şükranlarımı sunarım.

Ayrıca Sakarya Üniversitesi'nin 2020-7-25-26 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) projeleri için verdiği desteğe minnetle teşekkür ederim.

Mehmet Fatih KAHRAMAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür İncelemesi	3
1.2. Tezin Amacı	7
2. ÖKZETİK MALZEME VE YAPILAR	11
2.1. Hücresel Ökzetik Yapılar	13
2.1.1. Ökzetik yapılar	14
3. SONLU ELEMANLAR METHODU	17
3.1. Elastik ve Elasto-Plastik Analizler	18
3.1.1. Elastik analiz	18
3.1.2. Elasto-Plastik lineer olmayan analiz	18
4. ÇOK HÜCRELİ İNCE CİDARLI KİRİŞ YAPILARIN TASARIMI	19
4.1. Kesiti Ökzetik ve Ökzetik Olmayan Kiriş Yapıların Tasarımı	19
4.2. Ökzetik Kirişlerde Farklı Hücre Açısı ve Cidar Kalınlığı Tasarımı	20
4.3. Hibrit Kesite Sahip Kiriş Yapıların Tasarımı	23
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
5.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Üretim Yöntemi	27
5.1.1. Üretim yöntemi	27
5.1.2. 316L malzemesinin mekanik özellikleri	29
5.2. Üç Nokta Eğme Testi	30
5.3. Sonlu Elemanlar Modeli	31
5.3.1. Düzlem içi basma modeli	31
5.3.2. Kiriş yapıların sonlu elemanlar modeli	32
5.4. Eğme Davranışını Kıyaslama İçin Kullanılan Kriterler	33
5.5. Poisson Oranının Hesaplanması	35
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR	37
6.1. Deney Numunelerinin Üretimi ve Mekanik Özellikleri	37
6.2. Ökzetik Kiriş Yapının Üç Nokta Eğme Deneyi	39
6.2.1. Ökzetik olmayan petek yapıların deformasyonu	42
6.3. Ökzetik Hücre Kol Açısının ve Hücre Cidar Kalınlığının Değişiminin Eğilme Davranışı Üzerindeki Etkisi	56
6.3.1. Hücre kol açısının etkisi	57
6.3.2. Hücre cidar kalınlığının etkisi	61

6.4. Hibrit Kesitli Kiriş Yapıların Eğilme Performansı.....	65
6.4.1. Teorik analiz.....	66
6.4.2. Aux ve AuxOcta geometrik konfigürasyonların düzlem içi basma dayanımları.....	71
6.4.3. Üç nokta eğme testi.....	72
6.4.4. Poisson oranının dağılımı.....	75
6.4.5. Sonlu elemanlar analizi ve doğrulama	79
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	85
7.1. Genel Sonuçlar	85
7.2. Öneriler.....	87
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	99



KISALTMALAR

ASTM	: American society for testing and materials
CAD	: Bilgisayar yardımıyla dizayn
DMLS	: Direct Melting Lazer Sintering
EA	: Enerji absorbe
EPI	: Eğilme performans indeksi
HD	: Hasar duyarlılığı
Kİ	: Katmanlı imalat
NPO	: Negatif Poisson oranı
NS	: Negatif sıkıştırılabilirlik
SEA	: Spesifik enerji absorbe etme
SEM	: Scanning electron microscope
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SYT	: Spesifik yük taşıma



SİMGELER

W	: Eğilme momenti [N.mm]
I	: Kesit atalet momenti [mm ⁴]
δ	: Sehim [mm]
t	: Kalınlık [mm]
ϕ	: Plastik dönme
ρ	: Yoğunluk [gr/cm ³]
d	: Deplasman [mm]
$\bar{\rho}$	: Bağıl yoğunluk
M	: Kütle [N]
G	: Kayma Modülü [MPa]
E	: Elastisite Modülü [MPa]
ν	: Poisson's Oranı
B	: Bulk Modülü [MPa]
σ	: Gerilim [MPa]
ϵ	: Gerinim [mm/mm]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Deneysel testte kullanılan çok hücreli kirişler için geometrik parametreler.	24
Tablo 5.1. Metal 3B yazıcıda kullanılan 316L paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal bileşimi.	30
Tablo 6.1. DMLS katmanlı imalat yöntemiyle 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme numunesinin mekanik özellikleri.	39



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1.1.** Tipik bir kiriş görevi gören tüp yapıda eğilme yükü altında kuvvet-deplasman grafiğinin gösterimi..... 2
- Şekil 1.2.** Eğilme yüküne maruz kalan bir kiriş yapı için gerekli olan ideal çözüm önerisi..... 3
- Şekil 2.1.** Çekme ve basma yükleri altındaki (a) Klasik (b) Ökzetik malzemelerin davranışları..... 12
- Şekil 2.2.** 2000'den bu yana her yıl negatif Poisson oranlı yapılar konusunda yapılan yayın sayısı (Veriler Scopus arama motorundan elde edilmiştir). 13
- Şekil 2.3.** Ökzetik malzemelerin Milton-Ashby haritası. B bulk modülünü, G kayma modülünü ve ρ kütle yoğunluğunu temsil eder [80]. 14
- Şekil 2.4.** Ökzetik yapılar: (a) Re-entrant üçgen yapı, (b) Re-entrant yıldız yapı, (c) Sigma (re-entrant altıgen) yapı, (d) Dönen üçgen, (e) Dönen kare ve (f) Kiral yapı [84], (g) Katlanabilir yapı [85]..... 15
- Şekil 4.1.** Boş tüp ve çok hücreli kiriş yapılarının kesit geometrisi ve boyutları. Kiriş ana boyutları ve tek hücre yükseklikleri aynı olduğunu dikkat ediniz..... 20
- Şekil 4.2.** Aux kirişinin geometrik yapısı ve tasarımı (a) Birim hücre ile kiriş yapısı, (b) Hücre ve kesitteki farklı hücre cidarı açılarının gösterimi, (c) Kiriş kesitinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlık. 22
- Şekil 4.3.** Kesiti ökzetik ve sekizgen petek yapılardan oluşan ökzetik ve hibrit kiriş yapıların geometrik tasarımları: (a) Aux kesitin geometrik gösterimi, (b) Hibrit kesitin geometrik tasarım, (c) Aux kiriş yapıda ökzetik hücreye ait kalınlık bilgisi, (d) AuxOcta ve (e) Kademeli hibrit (optimize edilmiş AuxOcta yapısında hücre cidar kalınlıkları değişiklik gösterir) hücre konfigürasyonu, (f) 2D hibrit sistemin birim hücre geometrik konfigürasyonu..... 24
- Şekil 5.1.** DMLS üretim yöntemi: (a) EOS M290 üretim cihazı (b) DMLS üretimin şematik gösterimi. 28
- Şekil 5.2.** 316L paslanmaz çelikten DMLS ile üretilen numuneler: (a) Ökzetik hücre kesiti geometrisine sahip kiriş, (b) Homojen cidar kalınlıklarına sahip hibrit geometriye sahip kiriş ve (c) Hücre cidarkalınlıkları optimize edilmiş hibrit kiriş yapı..... 29
- Şekil 5.3.** (a) ASTM-E8 çekme test numunesi boyutları ($t = 2 \text{ mm}$), (b) DMLS katkılı üretim ile AISI 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme testi numuneleri, (c) Video ekstansometre ile çekme testi düzeneği 30
- Şekil 5.4.** Deneyisel test düzeneği: (a) Negatif Poisson oranı hücreleriyle donatılmış kiriş kesitli Aux kiriş yapı, (b) Hibrit kesite sahip AuxOcta, ve (c) Üç noktalı eğilme altında deneyisel test düzeneğinin gösterimi..... 31
- Şekil 5.5.** Basma yükü altında çok hücreli ökzetik yapının düzlem içi modeli 32
- Şekil 5.6.** Aux'un sonlu eleman simülasyonu: (a) Kirişin kesit alanı, (b) Üç noktalı eğilme testinin modellenmesi, (c) "z" yönünde ökzetik kesitli kiriş yapısının ağ dağılımı..... 32

Şekil 5.7. Poisson oranını hesaplamak için kullanılan kirişin enine kesitindeki düzlemler ve noktalar.	35
Şekil 6.1. DMLS ile işlenmiş Aux kirişin kesitinin SEM görüntüsü. Lazer tarama yönü yeşil düz oklarla gösterilmiştir; numuneler yoğun, çatlaksız ve kararlı lazer eritme izlerine sahiptir.	37
Şekil 6.2. (a) DMLS yöntemiyle AISI 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme numuneleri, (b) Video ekstansometrenin kullanıldığı çekme deney düzeneği, (c) Elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi.	38
Şekil 6.3. Eğme sonuçlarının karşılaştırılması; Ökzetik tüpün deneysel ve sayısal yük-deplasman eğrileri	40
Şekil 6.4. Mandrel'in farklı deplasman altında Aux kirişin orta noktasındaki kesitte oluşan deformasyon şekli ve Von-Mises gerilme dağılımı (aynı ölçek) diyagramının gösterimi: (a) 10 mm'lik deplasman, (b) 20 mm'lik deplasman ve (c) 30 mm'lik deplasman sonucu deneysel ve sayısal analizin gösterimi.	41
Şekil 6.5. Aux kiriş yapısının dış cidarının 30 mm deplasman sonucunda oluşan deneysel ve sayısal deformasyonların karşılaştırılması.	42
Şekil 6.6. Farklı kesitlere sahip kiriş yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	44
Şekil 6.7. Kiriş kesitinde oluşan şekil değişimleri ve hasarın görüldüğü deplasmanların değişimi.	48
Şekil 6.8. Kesit atalet momentinin mandrelin deplasmanla değişiminin ilişkisi. Grafikte mavi noktalar için belirtilen rakamlar, kırılma öncesi deplasman için Von-Mises gerilimini vermektedir	49
Şekil 6.9. Mandrel'in deplasman ile KAM'daki bağıl değişim.	50
Şekil 6.10. Çok hücreli kesite sahip kiriş yapılarda, hasar duyarlılığı ve eğilme performans indeksinin hücre geometrisiyle değişimi.	51
Şekil 6.11. Kesit boyutu ve hücre yüksekliği sabit kiriş yapılar için özgül yük taşıma kapasitesinin, özgül enerji absorbe etme kapasitesiyle değişimi.	53
Şekil 6.12. 6gen'in sonlu elemanlar analizi sonucunda deplasmana bağlı kesitte oluşan deformasyon ve kırılma.	54
Şekil 6.13. 8gen'in sonlu elemanlar analizi sonucunda deplasmana bağlı kesitte oluşan deformasyon ve kırılma.	55
Şekil 6.14. Aux'un sonlu elemanlar analizi sonucunda kesitte oluşan deformasyon ve hasar bölgesinin detayı.	56
Şekil 6.15. Aynı bağıl yoğunluk sahip kirişler için hücre kolu açısının yük-deplasman eğrisi üzerindeki etkisi.	58
Şekil 6.16. Farklı hücre kol açılarına sahip Aux kiriş kesitlerinde oluşan deformasyon ve Von-Mises gerilme dağılımı gösterimi: (a) 10 mm'lik deplasman, (b) 20 mm'lik deplasman ve (c) 30 mm'lik deplasman.	59
Şekil 6.17. Ökzetik hücre cidar açısındaki değişimin, kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme performansına etkisi.	60
Şekil 6.18. Aux-75 kiriş yapının kesitinde cidar kalınlığının fonksiyonel olarak değişiminin kevvet-deplasman grafiği üzerine etkisi.	62
Şekil 6.19. Hücre cidarları fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Aux yapıların orta kesitinin deformasyon şekli ve Von-Mises gerilme dağılımı diyagramı. ..	63
Şekil 6.20. Hücre cidar kalınlığının fonksiyonel olarak derecelendirilmesinin, Aux-75 kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme performansına etkisi.	64

Şekil 6.21. Hücre kol açışı ve cidar kalınlığının kademeli değişiminin, SYT ve SEA değerleri üzerindeki etkileri..	65
Şekil 6.22. Aux ve AuxOcta kirişinin hücresel yapısının kuvvet analizi: (a) Ökzetik hücrenin y yönündeki yüklemesi ve (b) Auxetik bölümün tahmini deformasyon davranışı ve (c) Hibrit birim hücrenin y yönündeki yüklemesi (d) Hibrit konfigürasyonun tahmini deformasyon davranışı.....	67
Şekil 6.23. “y” yönünde yükleme altında (a) Ökzetik hücrenin, (b) Hibrit hücrenin elastik deformasyonu.	68
Şekil 6.24. (a) Ökzetik hücre ve (b) AuxOcta (ökzetik ve sekizgen) hibrit hücrede y-yönlü yükleme altında plastik mafsall oluşumunun gösterilmesi..	70
Şekil 6.25. Düzlem içi basma durumları için sonlu eleman simülasyonu ve teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Aux, (b) AuxOcta	72
Şekil 6.26. İncelenen üç kesit için yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 6.27. Kirişlerin eğilme performanslarının karşılaştırılması: (a) AuxOcta ve AuxOcta-G'nin Aux kirişine göre SYT kapasitelerindeki iyileşme (b) 30 mm'lik deplasman için Aux kirişine göre SYT kapasiteleri, (c) Aux kirişine göre SEA kapasitesindeki iyileşme, (d) 30 mm'lik deplasman için yapıların SEA kapasiteleri.....	74
Şekil 6.28. Kesit geometrileri ve kesitteki Poisson oranının değişimi; (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G, kesit görüntüler numunelerin 30 mm'lik deplasman sonrası kritik (mandrelin temas noktası) kesitten su jeti ile kesilmesiyle elde edilmiştir.....	76
Şekil 6.29. Deneysel ve sonlu eleman eğme sonuçlarının karşılaştırılması (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G.	80
Şekil 6.30. Kiriş yapılarının gerinim (Von-Mises) dağılımı (a) Aux, (b) AuxOcta 30 mm deplasman sonrasında.	81
Şekil 6.31. Ökzetik ve hibrit kirişlerin farklı deplasman değerleri için (10, 20 ve 30 mm) kritik kesitteki deformasyon ve Von-Mises gerilme dağılımı. 30 mm deplasman için gerçek numunede elde edilen deformasyon durumunun karşılaştırılması: (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G.....	82



ÖKZETİK (AUXETİK) ÇOK HÜCRELİ KİRİŞ YAPILARIN EĞİLME DAVRANIŞI

ÖZET

Son yıllarda ince cidarlı kiriş yapılar, hafif, mükemmel yük taşıma kabiliyeti ve enerji absorbe edici özelliği yanında, uygun maliyet avantajı nedeniyle havacılık, uzay, askeri, otomotiv ve inşaat gibi birçok mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Kara ve hava taşıtlarının kazaya maruz kalması halinde hem dinamik hem de statik dış yüklemelerden oluşan karmaşık zorlanmaların etkisinde taşıtın yapısal bütünlüğünün bozulmasının yanı sıra, parçaların da hasara uğraması söz konusu olduğundan, mühendislik uygulamalarında yapısal bütünlüğün korunması en önemli başlıklar arasındadır. Genelde yüksek mekanik beklentiler beraberinde yapıların ağırlık artışına yol açması, sadece taşıtların performansını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda yakıt tüketiminde de artışa yol açar. Bu nedenle, yük taşıyıcı elemanların mekanik verim açısından geliştirilmesi için farklı geometriler önerilmiştir.

Petek yapılar, altıgen veya düzenli çokgen şekilli, birbirine bağlı hücrelerden oluşan geometrilerden oluşur. Bu yapılar, mühendislik uygulamaların birçok alanında kullanılmasının nedeni, diğer geometrilere göre daha düşük ağırlıkla, daha yüksek yük taşıma (yüksek mekanik verim) kabiliyeti sergilemesidir. İnce cidarlı kiriş yapıların mekanik performansın artırılmasında, kesiti petek yapıya sahip uygulamaların bulunmasına rağmen, bu yapıların yeteri hafiflikte ve aynı zamanda rijit ve yük taşıma kabiliyeti kombinasyonları sınırlıdır. Dolayısıyla, yüksek mekanik verime sahip özgün tasarımla birlikte, yeni malzeme türlerinin de geliştirilmesi kaçınılmazdır.

Ökzetik yapı/malzemeler negatif Poisson oranına sahip olmaları nedeniyle, geleneksel malzemelerden farklı olarak, çekme gerilmesi altında genişleme, basma gerilmesi altında ise daralma eğilimi gösterir. Ökzetik malzemeler, nadiren doğada bulunan yapılarda örneğin ağaç özü, mercanlar ve süngerlerin mikro yapılarında gözlemlenmektedir. Ökzetik malzemelerin bu mükemmel mekanik özellikleri taklit edilerek yapısal hasarların azaltılması veya ortadan kaldırılmasıyla, mühendislik tasarımlarında mekanik verim açısından daha yüksek performanslar elde edilmiştir. Bu kapsamda bir dizi ökzetik malzeme ve yapılar keşfedilmiş, teorik olarak tasarlanarak üretimi yapılmıştır. Katmanlı imalat (Kİ) tekniklerindeki gelişmeler, karmaşık hücresel mimarilere sahip malzemelerin üretilmesini mümkün kılmıştır.

Doktora tez çalışmasında, eğilme yükü altında çalışan kirişler için hafif ve yük taşıma kabiliyeti yüksek kesitlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Pozitif ve negatif Poisson oranına sahip petek yapılar ile kesiti en az farklı iki petek hücrelerden meydana gelmiş hibrit yapıların eğilme zorlanması altında deformasyon davranışları, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetlerinin deneysel, sayısal ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde, içi boş ince cidarlı kiriş yapının üç nokta eğme davranışı altında sergilediği deformasyon davranışı ve mekanik performansı detaylı olarak incelenmiş ve hasara uğrama nedeni detaylı olarak ele alınmıştır. Daha sonra, kiriş boyutları aynı

olan, aynı hücre sayısı ve yüksekliği için kesiti kare (kare), altıgen (6gen), sekizgen (8gen) ve ökzetik (Aux) çok hücreli kiriş yapıların eğilme davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Doğrusal olmayan sonlu eleman kodu LS-DYNA kullanılarak negatif ve pozitif kiriş kesitlerine sahip yapılar arasındaki yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetleri karşılaştırmalı bir çalışması yapılmıştır. Kurulan sonlu elemanlar analiz sonuçları, katmanlı imalat yöntemiyle 316L paslanmaz çelikten üretilen (Doğrudan Ergitme Lazer Sinterleme -DMLS) ökzetik kesite sahip Aux kiriş yapının deneysel eğme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan malzeme parametreleri aynı şekilde katmanlı imalat yöntemiyle ASTM E8/E8M-15a standartlarına göre çekme testlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, analiz ve deney sonuçlarının iyi bir uyuma sahip olduğu görülmüştür. İçi boş kiriş yapısında (BT), mandrelin temas alanındaki burkulma ve katlanma etkisiyle parçanın üst köşesinde kırılmanın meydana geldiğini göstermiştir. Kare, 6gen ve 8gen kiriş yapıları için kırılma, girintinin temas ettiği üst bölgelerdeki hücre cidarlarının burkulmanın neden olduğu lokalize stres nedeniyle meydana gelmiştir. Öte yandan, ökzetik hücrelerden oluşan yapının kesiti eğilme yükü altında yanal olarak daha az şekil değiştirmiş, cidarların merkeze doğru yönlendiği tespit edilmiştir. Böylece, yüksek deplasmana rağmen, yerel burkulma etkisi en aza indirilebilmiştir. Bu durum, kesit atalet momentindeki düşüşün sınırlı kalmasına sağlamıştır. Sonuç olarak yük taşıma kabiliyeti ve buna bağlı olarak enerji absorbe etme kapasitesi daha yüksek olan bir yapı elde edilmiştir.

İncelenen farklı hücre kesitlerinin performansının değerlendirilmesinde kiriş hacmi ve hasar deplasmanının kesit atalet momentindeki değişim etkisi incelenerek boyutsuz bir büyüklük “hasar duyarlılığı” (HD) tanımlanmıştır. Sonuçlara göre, hesaplanan “Hasara duyarlılık” değeri beklendiği üzere, içi boş kiriş (BT) için en yüksek ve içi dolu kesit için ise en düşük olduğu görülmüştür. Aux kiriş, çok hücreli kiriş yapılar arasında hasar duyarlılığı en düşük olan yapıdır. Ayrıca, içi dolu kirişe göre yapıların mekanik özelliklerini ifade etmek için bir diğer yaklaşım olarak, çok hücreli yapının hasar duyarlılığının içi dolu yapının hasar duyarlılığına oranlanmasıyla eğilme performansı indeksi (EPI) tanımlanmıştır. Aux kirişin benzer şekilde EPI değeri, içi dolu kirişten sonra en iyi olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan incelemeler neticesinde Aux yapının spesifik yük taşıma (SYT) kapasitesi 6gen, kare ve 8gen kiriş yapılarından sırasıyla %45,6, %29 ve %11,4 daha yüksektir. Ayrıca, spesifik enerji absorbe (SEA) kapasitesi açısından da 6gen, Kare ve 8gen petek kirişli çok hücreli kirişten sırasıyla 11,3, 3,8 ve 1,8 kat daha iyi performans göstermiştir. Buna göre, ökzetik kesitin yüksek deformasyon altında daha yüksek mekanik performans sergilediği anlaşılmıştır.

İlginç bir şekilde ilk bölümde, kiriş kesitinin negatif Poisson oranına sahip hücrelerden oluşturulması, kesitteki deformasyon yönünü değiştirebileceğini ve yapının daha uzun deplasmanlarda yük taşıma kabiliyetini sürdürdüğü tespit edilmiştir.

İkinci bölümde çalışma, ökzetik hücre kol açısının ve cidar kalınlığının fonksiyonel olarak derecelendirilmesinin kiriş performansına olan etkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda ökzetik hücrelerin kiriş eksenine boyunca yönlendirildiği kiriş yapısının 55, 65,75 ve 85 derece kol açısı ve üç tip fonksiyonel olarak derecelendirme durumu için cidar kalınlığının etkisi deneysel ve sayısal olarak sistematik biçimde incelenmiştir. Kiriş ağırlığının sabit tutulması şartıyla birim hücre kolunun açısının artırılmasıyla, Aux kiriş kesitinin negatif Poisson oranında değişim meydana getirmesiyle beraber kiriş yapının yük taşıma kabiliyeti ve enerji absorbe etme

yeteneğinin belli bir noktaya kadar iyileşmesinde faydalı olduğu görülmüştür. Hücre kol açısının daha büyük değerler alması kirişin eğilme performansında sınırlı bir iyileştirme sağlamasına rağmen daha düşük deplasmanlarda hasar meydana gelmiştir. Birim hücre cidar açısının 55 dereceden 75 dereceye çıkarılmasıyla Aux kiriş yapının eğilme performansı SYT ve SEA'sında sırasıyla %11 ve %12.4 oranında iyileşme sağladığı bulunmuştur. Elde edilen en iyi hücre açısı (75) esas alınarak yapının hücre kolu kalınlıkları tarafsız eksenden dış cidara doğru fonksiyonel derecelendirilerek arttırılması halinde ise ağırlıkta artışa rağmen, spesifik değerlerde, SYT ve SEA sırasıyla %19.4 ve %25.4 gibi daha ileri iyileştirmelerin gerçekleştirilebilmesi mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

Üçüncü bölümde ise, Aux çok hücreli kirişlerin ile ökzetik ve sekizgen hücreli yani hibrit (AuxOcta) bir (literatür için yeni) kiriş tasarım üzerinde durulmuştur. Ökzetik yapılar 316L paslanmaz çelik ile DMLS katmanlı imalat yöntemiyle üretilmişlerdir. Üç nokta eğme testi sonuçları, Aux kiriş yapının kesitin de kademeli lokal deformasyon gösterdiğini, AuxOcta kirişin kesitindeki hücrelerinin ise deformasyonun kesitin geneline yayıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, AuxOcta yapının yük taşıma ve enerji absorbe etme kapasitelerini iyileştirmek için hücre cidar kalınlıkları tarafsız eksenden dış cidara doğru optimize edilmiştir. Bu optimize edilmiş AuxOcta yapısı (AuxOcta-G) test sonuçlarına göre üstün eğilme performansı sunmaktadır. Aux yapısı ile karşılaştırıldığında, yukarıdaki AuxOcta-G yapısının özgül yük taşıma (SLC) kapasitesindeki iyileşme 5 mm deplasman için %15 iken, özgül enerji absorbe etme (SEA) kabiliyetindeki iyileşme yaklaşık %16'ya ulaşmaktadır. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) sonuçları, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının geniş bir deplasman aralığında tercih edilen bir deformasyon davranışı sunduğunu göstermiştir. Bu çalışma, negatif Poisson oranlı kesite sahip ökzetik ve/veya hibrit kiriş tasarımının gelecekteki araştırmaları için bir temel oluşturması beklenmektedir.



BENDING BEHAVIOUR OF AUXETIC MULTICELLULAR BEAM STRUCTURES

SUMMARY

In recent years, thin-walled beam structures have been widely popular in many engineering applications such as aviation, aerospace, military, automotive and construction due to their light weight, excellent load carrying ability and energy absorbing capability as well as their cost-effective advantage. In the event of an accident to land and air vehicles, the protection of structural integrity is the most important issue in engineering applications, since the structural integrity of the vehicle may be damaged as well as the parts may be damaged under the influence of complex stresses consisting of both dynamic and static external loads. In general, high mechanical expectations lead to an increase in the weight of structures, which not only reduces the performance of vehicles but also leads to an increase in fuel consumption. In this context, different geometries have been developed to improve the mechanical efficiency of load-carrying components.

Honeycomb structures consist of hexagonal or regular polygonal shaped geometries consisting of interconnected cells. These structures are used in many areas of engineering applications because they exhibit higher load carrying capability (high mechanical efficiency) with lower weight than other geometries. Although there are applications to improve the mechanical performance of thin-walled beam structures with honeycomb cross-sectional structures, the combination of high stiffness and load carrying capability with sufficient weight saving is limited. Therefore, it is inevitable to develop materials/structures with unique design and unusual mechanical properties for structures with high mechanical efficiency.

Auxetic materials have negative Poisson's ratio. Unlike conventional materials, materials with negative Poisson's ratio tend to expand under tensile stress and contract under compressive stress. Auxetic materials are rarely observed as structures found in nature in the microstructures of tree sap, corals, and sponges. By mimicking these excellent mechanical properties of auxetic materials, the mechanical performance of engineering designs can be improved by reducing or eliminating structural damage. Several auxetic materials and structures have been demonstrated, theoretically designed and fabricated. Advances in additive manufacturing (AM) techniques make it possible to produce materials with complex cellular architectures.

In this study, the focus is on the development of lightweight and high load-carrying cross-sections for beams subjected to bending. The deformation behavior, load carrying and energy absorption capabilities of honeycomb structures with positive and negative Poisson's ratio cross-sections and hybrid geometries consisting of at least two different honeycomb structures are investigated experimentally, numerically and theoretically. The study consists of three main parts.

In the first section, the deformation behavior and mechanical performance of the hollow thin-walled beam structure under three-point bending behavior are investigated

in detail and the cause of damage is discussed in depth. Then, the bending behaviour of square (Squ), hexagonal (Hex), octagonal (Octa) and auxetic (Aux) multicellular beam structures with the same beam dimensions, number of cells and height were investigated by finite element method. A comparative study of the load carrying and energy absorption capabilities between structures with negative and positive beam cross-sections has been carried out using the nonlinear finite element code LS-DYNA. The results of the finite element analyses are compared with the experimental results of the Aux beam structure with auxetic cross-section produced from 316L stainless steel (Direct Melting Laser Sintering-DMLS) by additive manufacturing method. The material parameters used in the finite element method were used in the same way as the data obtained from tensile tests according to ASTM E8/E8M-15a standards by additive manufacturing method. The numerical and experimental results were found to be in good agreement. In the hollow beam structure (BT), it was shown that fracture occurred in the upper corner of the part due to buckling and folding effect in the contact area of the indenter. For the Squ, Hex and Octa beam structures, fracture occurred due to localized stress caused by buckling of the cell walls in the upper regions where the indenter contacts. On the other hand, the cross-section of the structure consisting of auxetic cells was less laterally deformed under bending load and the walls were found to be oriented towards the center. Thus, despite the high displacements, the local buckling effect could be minimized. This resulted in a limited decrease in the cross section moment of inertia. As a result, a structure with higher load carrying capacity and consequently higher energy absorption capacity was obtained.

In assessing the performance of different cell sections, the effect of beam volume and damage displacement on the change in the cross-section moment of inertia was analyzed and a dimensionless quantity "Failure Sensitivity" (FS) was defined. According to the results, the calculated FS was found to be the highest for the hollow beam (HT) and the lowest for the solid beam, as expected. Aux beam has the lowest failure sensitivity among the multicellular beam structures. In addition, as another approach to express the mechanical properties of the structures with respect to the solid beam, the bending performance index (BPI) was defined as the ratio of the failure sensitivity of the multicellular structure to the failure sensitivity of the solid structure. Similarly, the BPI of the Aux beam was found to be the best after the solid beam.

As a result of the analyses, the specific load carrying (SLC) capacity of the Aux structure is 45.6%, 29% and 11.4% higher than that of the Hex, Squ and Octa beam structures, respectively. In addition, in terms of specific energy absorption (SEA) capacity, it performed 11.3, 3.8 and 1.8 times better than the Hex, Squ and Octa honeycomb multicellular beams, respectively. Accordingly, it is understood that the auxetic cross-section exhibits higher mechanical performance under wide range displacement.

Interestingly, in the first part, it was found that the beam with negative Poisson's ratio cells can change the direction of deformation in the cross section and the structure remains capable of carrying loads at wide displacement ranges.

In the second section, the study is focused on the effect of the auxetic cell arm angle and functional grading of the cell wall thickness on the beam performance. In this context, the effect of 55, 65, 75 and 85-degree cell wall angle and wall thickness for three types of functionally graded cases of the beam structure in which the auxetic cells are orientated along the beam axis are systematically investigated in an experimental and numerical way. By increasing the angle of the unit cell wall with

constant beam weight provided that the beam structure's load carrying ability and energy absorption capability are improved up to a certain point with the change in the negative Poisson's ratio of the Aux beam cross-section. Although larger values of the cell wall angle provided a limited improvement in the bending performance of the beam, damage occurred at lower displacements. By increasing the unit cell wall angle from 55 degrees to 75 degrees, it was found that the bending performance of the Aux beam structure improved SYT and SEA by 11% and 12.4%, respectively. Based on the best cell angle (75) obtained, it is found that if the cell wall thicknesses of the structure are increased by functional grading from the neutral axis to the outer wall, it is possible to realize further improvements in specific values, SYT and SEA, 19.4% and 25.4%, respectively, despite the increase in the beam weight.

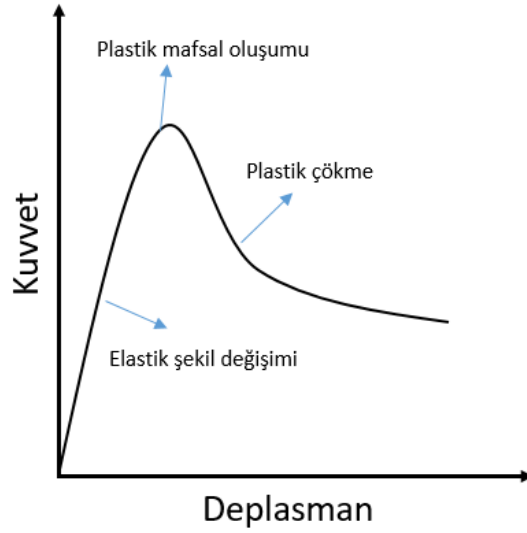
In the third section, the design of Aux multicellular beams and a hybrid (AuxOcta) beam design (new for the literature) with auxetic and octagonal cells is investigated. Auxetic structures were manufactured with 316L stainless steel by DMLS additive manufacturing method. Three-point bending test results show that the cross-section of the Aux beam structure shows gradual local deformation, while the deformation of the cells in the cross-section of the AuxOcta beam is spread throughout the cross-section. Furthermore, the cell wall thicknesses were optimized from the neutral axis to the outer wall to improve the load carrying and energy absorption capacities of the AuxOcta structure. This optimized AuxOcta structure (AuxOcta-G) offers superior bending performance according to the test results. Compared to the Aux structure, the improvement in the specific load carrying capacity (SLC) of the AuxOcta-G structure is 15% for 5 mm displacement, while the improvement in the specific energy absorption (SEA) capability reaches about 16%. The Finite Element Method (FEM) results showed that the AuxOcta and AuxOcta-G structures offer a desirable deformation behaviour over a wide displacement range. This study is expected to provide a basis for future investigations of auxetic and/or hybrid beam design with a cross section of negative Poisson's ratio.



1. GİRİŞ

Artan araç sayısı ve iklim değışikliklerine yönelik mevcut küresel ulaştırma politikaları, ulaştırma endüstrisini yeni nesil araçlardaki sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaya zorlamıştır [1]. Araç ağırlığının azaltılması, zararlı emisyonların azaltılması ve yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi için kabul edilmiş iyi bilinen bir stratejidir [2]. Örneğin, araçlarda 100 kg'lık bir ağırlık azalması yakıt tüketimini 100 km'de 0.3-0.5 l azaltabilmekte ve bu da 100 km'de yaklaşık 0.85–1.4 kg CO₂ emisyonunda bir azalmaya yardımcı olmaktadır [3]. Ayrıca bilindiğı üzere ince cidarlı kirişler çeşitli mühendislik alalarında, özellikle otomobil, gemi ve uçak gibi hareketli araçlarda önemli bir yapı elemanı olarak rol oynamaktadır [4]. İnce cidarlı kiriş yapılar, yük taşıma kapasitesi, deformasyonun kontrol edilebilirliği ile birlikte enerji absorbe etme verimliliğı ve uygun maliyet açısından da birçok mühendislik alanında sıklıkla başvuru yapı elemanıdır. Bu kapsamda ince cidarlı yapılar hafif yapı tasarımı bakımından da ilgi çekicidir.

İnce cidarlı kiriş yapılar ağırlık avantajları neticesinde yapı elemanı olarak kullanılmasına rağmen, yük taşıma kabiliyeti beklentilerini karşılama açısından yetersiz kalabilmektedir. Eğme zorlanması altında, bu tür yapıların lokal burkulmaya bağılı olarak erken katlanma göstermesi yük taşıma kapasitesini kötüleştirmekte ve elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinde kuvvetin hızla düşmesine yol açmaktadır (Şekil 1.1). Literatür dikkate alındığında, eğme zorlaması için hasar mekanizmasını geciktirmeye yönelik farklı takviye unsurlarından (içeriden ve dışarıdan; köpük, elyaf takviye) yararlanıldığı görülmektedir. Örneğin silindirik, kare ve dikdörtgen kesitli ince cidarlı kirişlerde yük taşıma ve enerji emme verimliliğini arttırmaya yönelik gözenekli malzemeler takviye etmek yanı sıra ve farklı geometrik hücreye sahip (bal peteğı, kare, vb.) kesitler üzerine çalışıldığı da dikkat çekmektedir [5-7].



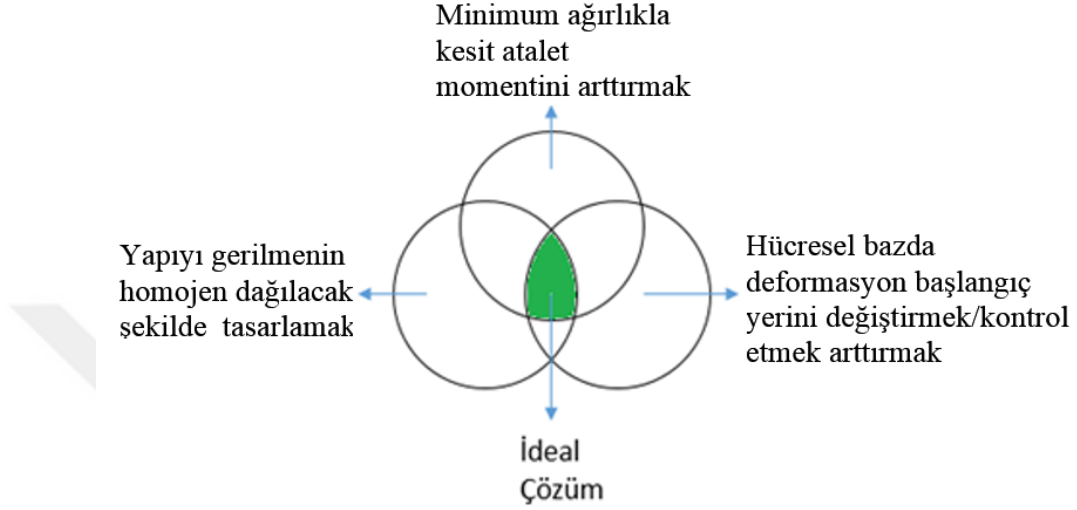
Şekil 1.1. Tipik bir kiriş görevi gören tüp yapıda eğilme yükü altında kuvvet-deplasman grafiğinin gösterimi.

I/M (kesit atalet momenti/ağırlık) oranı, rijitlik, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti yüksek, hafif yapılar geliştirmek özellikle hafifliğin önemli olduğu mühendislik uygulamaların da (örneğin otomotiv ön çarpışma kutuları, kapı koruma çubukları, tampon gibi) yapısal elemanların yüksek mukavemet ve tokluğu sahip olması istenmektedir.

Bilindiği gibi, malzemeler çekme yükü altında enine daralma gösterirken, basma yükünde enine genişleme eğiliminde olup poission oranı metaller için 0.3 mertebelerindedir. Bir kirişte eğilmenin meydana geldiği yöne dik doğrultuda, basma bölgesinde Poission oranıyla orantılı olarak bir genişleme meydana gelirken ve çekme bölgesi civarında daralma oluşmaktadır [8, 9]. Bu davranış ince cidarlı yapılarda yükün tatbik edildiği bölgenin çevresinde lokal burkulmayı şiddetlendiren bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, poission oranının büyüklüğüne bağlı olarak gelişen şekil değişiminin daha az olmasını sağlayacak önlemler yapının yük taşıma kabiliyetini iyileştirecektir.

Yukarıda sözü edilen davranışın tersine yani, çekme yükü altında daralma yerine genişleme gösteren, basma yükünde ise daralma eğilimi gösteren Ökzetik olarak adlandırılmaktadır. Negatif poission oranına sahip yapıların kiriş görevi gören parçaların imalatında kullanılması özgül yük taşıma değeri açısından oldukça önemlidir. Diğer bir ifadeyle yükün, sadece tatbik edildiği bölge tarafından değil aynı zamanda yakın çevresi tarafından homojen olarak taşınması anlamına gelmektedir.

Özet olarak yukarıda anlatılan temel başlıkları karşılamak için eğilmeye çalışılan kiriş yapının yüksek deplasman değerlerinde rijit ve tok bir yapının elde edilmesi için Şekil-1.2’de sunulmuş temel faktörlerin yerine getirilerek sağlanması mümkün olacaktır. Bunun sonucu olarak muadilleriyle aynı ağırlıktaki bir kirişten çok daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olması mümkün olacaktır.



Şekil 1.2. Eğilme yüküne maruz kalan bir kiriş yapı için gerekli olan ideal çözüm önerisi.

1.1. Literatür İncelemesi

Petek yapıların otomotiv, havacılık ve ulaşım mühendisliğinin yanı sıra kişisel koruyucu ekipmanların tasarımında da geniş kullanım alanı bulduğu bilinmektedir [10-13]. Bunun nedeni, Gibson ve Ashby [14] belirttiği üzere, yüksek rijitlik ve kayda değer mekanik verim (taşınan yük/ağırlık) gibi dikkat çekici özelliklerin yanı sıra enerjinin verimli bir şekilde absorbe etme yeteneğidir. Ayrıca, Galehdari ve Khodarahmi [15] çokgen yapılar iyi bir hasar toleransı sunmalarından dolayı genellikle darbe gibi hasarlardan sonra işlevsel kalmanın kritik olduğu yapısal rollerde kullanıldıklarını belirtmişlerdir. Sethi ve ark. [16], Zhang ve ark. [17] belirttikleri gibi doğadan esinlenerek oluşturulan bu çok hücreli petek yapıların malzeme özelliklerine bağlı elastik özellikler ile hasar toleransı ve/veya tokluk arasında mükemmel bir ilişkiye sahiptir. Temel soru ise bu yapılar elasto-plastik bölgede yapısal işlevini kaybetmeden hasar toleransını iyileştirmenin mümkün olup olmadığıdır.

Hafif ve dayanıklı tasarım için, içi boş kirişler veya çok hücreli kesitlerden [18–20] oluşan kiriş yapılar, ayrıca enerji absorbe edici özellikleriyle birlikte

değerlendirilmektedir. Albak [21] ve Zheng ve ark. [22] kiriş yapılarının amacının mekanik performans kaybı olmadan ağırlığı mümkün olduğunca azaltmanın önemli olduğunu vurgulamışlardır. Çok hücreli tüplerin yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırmalı bir çalışması, hücre sayısının enerji absorbe etme kabiliyetini artırdığını göstermektedir. Artan hücre sayısı ağırlık da artırdığından, daha fazla hücreye sahip kirişlerin birim ağırlık başına daha fazla enerji absorbe ettiği sonucu çıkarılamaz.

Kallina ve ark. [23] gerçek kaza vakaları (81 adet) üzerinden yaptıkları incelemelerde statik ve dinamik yük taşıyan kiriş elemanların yaklaşık %90 oranında eğilme hasarına maruz kaldıklarını belirlemişlerdir. Ancak, Hilditch ve ark. [24], Lavayen-Farfan ve ark. [25], Poonaya ve ark. [26] ve Su ve ark. [27] yaptıkları araştırmalar sonucu ince cidarlı parçalar hafif olmalarına rağmen, lokal burkulma nedeniyle yük taşıma kabiliyetleri sınırlı kaldığını göstermişlerdir. Lokal burkulmanın, bir anlamda zemin hazırladığı bükülme sonrası kuvvet-deplasman eğrisinde kuvvet hızla düşmekte ve kiriş görevi gören tüp yapı artık yük taşıma kabiliyetini tamamen yitirmektedir [28]. Argyridi ve Sapountzakis [29], Ayhan ve ark. [30] ve Kecman [31] yaptıkları çalışmalarda lokal burkulma, kiriş yapıların yük taşıma ve enerji absorbe etme kapasitesini doğrudan etkilediği için kiriş yapıların performansını doğrudan etkilemektedir. Burkulmaya bağlı hasar mekanizmasını geciktirmek için kiriş yapıların iç [32, 33] ve dış [34, 35] kısımları farklı malzemelerle güçlendirerek yük taşıma kapasitesini ve enerji absorbe etme kabiliyetini artırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Nian ve ark. [20] alüminyum dairesel tube içerisine çok hücreli altıgen petek yapıdan oluşan çok hücreli takviye yapı yerleştirmişler ve içi boş tupe göre spesifik absorbe etme yeteneğini artış sağlamışlardır. Palombini ve ark. [36] eğilme yükleri altında bambudan esinlenerek yapılan alüminyum alaşımlı kiriş yapıların deformasyon ve çökme mekanizmasını araştırmak için sayısal yöntemle dayalı bir dizi analiz gerçekleştirmiştir. Literatürdeki modellerle karşılaştırıldığında, belirli bir deplasmandan sonra yük taşıma kapasitesi azalsa bile spesifik enerji absorpsiyon oranı yaklaşık %17 daha yüksek çıkmıştır. Yin ve ark. [37] maksimum SEA kapasitesini elde etmek için yanal yükleme durumları altında çeşitli kesit formlarına sahip farklı tipte köpük dolgu çok hücreli kiriş yapılarını incelemiştir. Sonuçlar, çok sayıda çok hücreli kare kiriş yapılarının eğilme davranışında daha yüksek dirence sahip olduğunu gözlemlerse de, kirişin yük taşıma kapasitesi belirli bir deplasmandan sonra azalma eğilimi göstermiştir. Li ve Wang [35] eğme yükü altında çalışan bal peteği hücrelere

sahip kiriş yapılarının lokalize gerilme yoğunlaşması nedeniyle erken deformasyonda yıkıcı hasarlara maruz kaldığını belirtmişlerdir. Yukarıdaki analize ışığında, üç nokta eğmeden dolayı hasar, yükün uygulandığı yerde yerel deformasyonla başlar ve daha sonra bütünleşik rijit gövdenin dönmesi nedeniyle genel eğilme meydana gelir. Ayrıca, eğimli ve dik hücre kollarının plastik deformasyonu sınırlıdır, bu da yapının maksimum performans gösterememesine neden olur.

Öte yandan, özellikle karmaşık yapıların 3B eklemeli üretim teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde, benzersiz deformasyon şekli ve mekanik özellikleri nedeniyle negatif Poisson oranlı (NPO) yapılar, araştırmacılar arasında büyük ilgi gören bir konu haline gelmiştir. H. Jiang ve ark. [38], Ren ve ark. [39] ve Xu ve ark. [40] NPO ile yapay olarak tasarlanmış ökzetik hücresel yapıların, geleneksel yapılar tarafından elde edilme zor olan sıradışı mekanik özelliklere sayesinde birçok mühendislik uygulamaları için potansiyel bir çözüm sunduklarını belirtmişlerdir. Bu olağanüstü mekanik özellikler arasında ultra hafif yapılar [41, 42], negatif Poisson oranı [43-45], ve mükemmel enerji absorbe ediciler [46] ve deplasmana bağlı olarak deformasyonu yönlendirme yeteneği [47] bulunmaktadır.

Ökzetik malzemelerin benzersiz mekanik özellikleri ilk olarak Lakes [48] tarafından ortaya konmuştur. Shokri Rad ve ark. [49], Warner ve ark. [50] göre, ökzetik davranışın temeli, NPO sergileyen birim hücrenin mekanik özelliklerinde yatmaktadır. Bu benzersiz davranışın tekil hücrelerden tüm yapıya aktarılması, birim hücreler arasındaki bağlantı elemanları tarafından kolaylaştırılır. Global deformasyonun meydana geldiği ökzetik yapının bu benzersiz davranışı, geleneksel yapılardan önemli ölçüde farklı mekanik performansa yol açmaktadır. Li ve Wang [30] içyapısı ökzetik petek yapılardan oluşan sandviç kirişin deformasyon tepkisini ve hasar modunu araştırmak için yüksek hızlı alüminyum köpük mermi testi uygulamıştır. Deney bulguları, ökzetik hücrelerin sadece ilk önce sıkıştırma deformasyonuna uğramadığını, aynı zamanda komşu ökzetik hücrelerin de önemli büzülme deformasyonuna maruz kaldığını ve yükleme alanına yönlendirildiğini göstermektedir; dolayısıyla NPO etkisi nedeniyle global deformasyon açıkça görülmüştür. Ökzetik yapının global deformasyondan kaynaklanan bu olağandışı davranışı, mekanik performansı, yerel burkulma etkisinin iyileştirilmesi nedeniyle daha yüksek eğilme performansı gibi geleneksel yapılardan önemli ölçüde farklı olduğu söylenebilir. X. Zhao ve ark. [51] çift oklu ökzetik yapının dinamik darbe direncini araştıran çalışmalarında benzer

deformasyon modu elde etmiştir. Novak ve ark. [52], kiral ökzetik hücreli sandviç yapının patlama kuvveti altındaki qua-statik darbe davranışı üzerine sayısal bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Ayrıca, maksimum sapma ve SEA (spesifik enerji absorbe) için geometrik parametrelerin (birim hücre geometrisi ve kalınlığı) etkisini araştırmışlardır.

Essassi ve ark. [53], Ruzzene ve Scarpa [54] ve X. Zhao ve ark. [55] yaptıkları çalışmalarda ökzetik hücrelerden oluşan sandviç kirişlerin üç nokta eğilme yükü altında gösterdikleri mekanik davranışı araştırmak için sayılı sayıda deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Yazdani Sarvestani ve ark. [56], ökzetik sandviç yapıların geometrik parametrelerin ve çekirdek topolojisinin hasar mekanizmaları ve enerji absorbe etme yetenekleri üzerine önemli bir rol oynadığını bulmuştur. Li ve Wang [35], Menon ve ark. [57] ökzetik hücrelerden oluşan sandviç kirişlerin eğilme mekanizması üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yapılardaki şekil değişiminin global olarak baskın olduğunu, yerel deformasyonun ve ilgili kırılma hasarının en aza indirildiğini ve etkili gerilmenin hem yüzey katmanlarında hem de çekirdek malzemede nispeten homojen dağılım sergilediğini beyan etmişlerdir. Meena ve Singamneni [58] geliştirdikleri NPO yapıların yüksek deformasyonunda, ökzetik hücrelerin etkileşimi nedeniyle yapılardaki eşdeğer gerilmenin düşük kaldığını belirtmişlerdir. Yukarıda bahsedilen bu olağanüstü mekanik davranışlar, büyük deformasyonlarda bile üstün yük taşıma [59], mükemmel enerji absorbe etme [60] ve etkili darbe direnci [61] sunan yapıdaki ökzetik hücrelerin etkileşimi yoluyla elde edilir. Bu nedenle C. Li ve ark. [62] ve Türkoğlu ve ark. [63] ökzetik yapıların geleneksel petek yapılardan daha yüksek eğilme direnci davranışı sergilediğini bildirmişlerdir. Ancak, Meena ve Singamneni [64] eksenel yönelimli ökzetik kirişlerin, kafes kiriş ve dolu kirişlere kıyasla aynı yük altında daha büyük şekil değişimine maruz kaldığını açıklamışlardır.

Öte yandan, Li ve Wang [35] içi dolu, kafes ve petek kiriş yapıların lokal gerilme yığılması nedeniyle daha erken deplasman değerlerinde hasara uğradığını tespit etmişlerdir. Jin ve ark. [65] ökzetik yapılarda, artan deformasyonla birlikte ökzetik hücrelerin bu bölgeye yönelmesiyle kuvvetin uygulandığı bölgenin bağlı yoğunluğunun arttığını; böylece yapı üzerindeki maksimum yerel gerilme büyüme oranının azaldığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde, Osuna-Sequera ve ark. [66] ve Y. Li ve ark. [67] özgün ökzetik hücre tasarımları sayesinde kirişlerin mekanik

performanslarını geliştirilebilme imkânının olduğunu öne sürmüşlerdir. Johnston ve Kazancı [68] tarafından geliştirilen özgün ökzetik yapı sayesinde, kuvvetin uygulandığı bölgenin bağıl hacim yoğunluğu deformasyonla birlikte artmakta, böylece yapı üzerindeki maksimum yerel gerilme büyüme oranının azaldığını bu sayede efektif gerilimin hem yüzey katmanları hem de çekirdek yapı boyunca nispeten homojen bir şekilde dağıldığını bulmuşlardır. Buna ek olarak, Velásquez ve ark. [69] ökzetik hücreler arasındaki etkileşim nedeniyle ökzetik yapılardaki eşdeğer gerilmenin yüksek deformasyonda düşük kaldığını belirtmiştir. Bu yapıların üstün yük taşıma kapasitesi, mükemmel enerji absorbe etme kabiliyeti ve etkili darbe direnci, ökzetik hücreler arasındaki etkileşime ve negatif Poisson oranı davranışlarına bağlanmaktadır. Ayrıca üç nokta eğilme kuvveti altındaki kiriş yapılarda kuvvetin uygulandığı üst cidarda ve üst cidara yakın bölgelerde burkulma meydana gelmekte ve burkulma sonucunda gerilme yığılması oluşmakta ve parça bu gerilme yığılma bölgesinden hasar görmektedir. Negatif Poisson oranına sahip bir kiriş kesit geometrisi geliştirilerek kesitteki yerel deformasyon engellenebilir ve kiriş yapıların mekanik performansı iyileştirilebilir. Sonuç olarak, deformasyonun şeklinin değiştirilmesi, yükün tüm yapıya dağıtılmasına yardımcı olarak hasar mekanizmasını önleyebilir veya erteleyebilir.

1.2. Tezin Amacı

Bu doktora tez kapsamında yapılan çalışmalar kronolojik sıraya konulduğunda üç ana başlıkta incelenir:

Literatürde, ökzetik ve ökzetik olmayan petek yapılardan oluşan kesite sahip kiriş yapıların eğilme davranışı üzerine yeterince araştırmanın yapılmadığı anlaşılmıştır. Bu çalışmanın ilk bölümünde, kesiti farklı petek yapılara sahip ince cidarlı kiriş yapıların eğilme performansını ve hasar deformasyonu sistematik olarak incelenmiştir. Kiriş yapıların eğme yükü altındaki deformasyon davranışı belirlenmesinde üç nokta eğilme testlerinden yararlanılmıştır. İlk etapta, aynı geometrik parametrelere sahip kare, altıgen ve sekizgen gibi farklı çok hücreli kesite sahip kiriş yapıların eğme davranışları deneysel ve nümerik olarak detaylı olarak incelenmiştir.

Literatürde ökzetik hücrelerden oluşan çok hücreli yapıların düzlem içi basınç davranışı üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, kiriş uygulamaları üzerine nispeten sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak, bugüne kadar yapılan çalışmaların

hiçbirinde ökzetik hücrelerin kiriş eksenini boyunca yönlendirildiği bir kiriş yapısının eğilme altındaki davranışı sistematik olarak incelenmemiştir. Doktora çalışmasının ikinci bölümünde, öncelikle ökzetik hücre açısının (55-85 derece) değişimiyle beraber kiriş yapısının mekanik performansları incelenecektir. En iyi performansın gösterdiği ökzetik hücre kol açısı durumu için kesitte hücre kol kalınlığı üç tipte fonksiyonel derecelendirilme durumu için eğilme performansı üzerine inceleme genişletilmiştir. Aux kirişlerini imal etmek için DMLS katmanlı imalat üretim teknolojisi kullanılmıştır. Sayısal model doğrulanarak Aux kiriş numunelerinin yük taşıma, enerji absorbe etme kapasitesi ve deformasyonu incelenecektir.

Bilindiği üzere, eğilme yükü altında çalışan kiriş yapılarda tarafsız eksen ve bu bölgeye etrafında gerilme en düşük seviyede kalmaktadır. Dolayısıyla, tarafsız eksen ve civarına ökzetik hücreler ile geometrik uyum sağlayan, ökzetik hücrelerin çalışma aralığını arttıracak, kiriş yapısını ağırlığını azaltacak ve aynı zamanda kiriş kesitinin atalet momentini arttıracak hücrelerle desteklenmesi kiriş yapısının performansını arttıracakı öngörülmüştür. Bu kriterleri sağlayacak kesit geometrisi tasarımları sunulmuştur. Bu doktora çalışmasının üçüncü ve son aşamasında ise, kiriş kesit geometrisi için özgün hibrit tasarımlar önerilmektedir. Yeni hücre konfigürasyonu, iki farklı hücreyi ortak hücre kolu ile bağlayan pozitif ve negatif Poisson oranı arasında geçiş yapabilen AuxOcta olarak adlandırılmaktadır. Önerilen analitik, sayısal modellerin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu teyit etmek için DMLS eklemeli imalat ile AuxOcta hibrit yapı konfigürasyonları üretilmiştir.

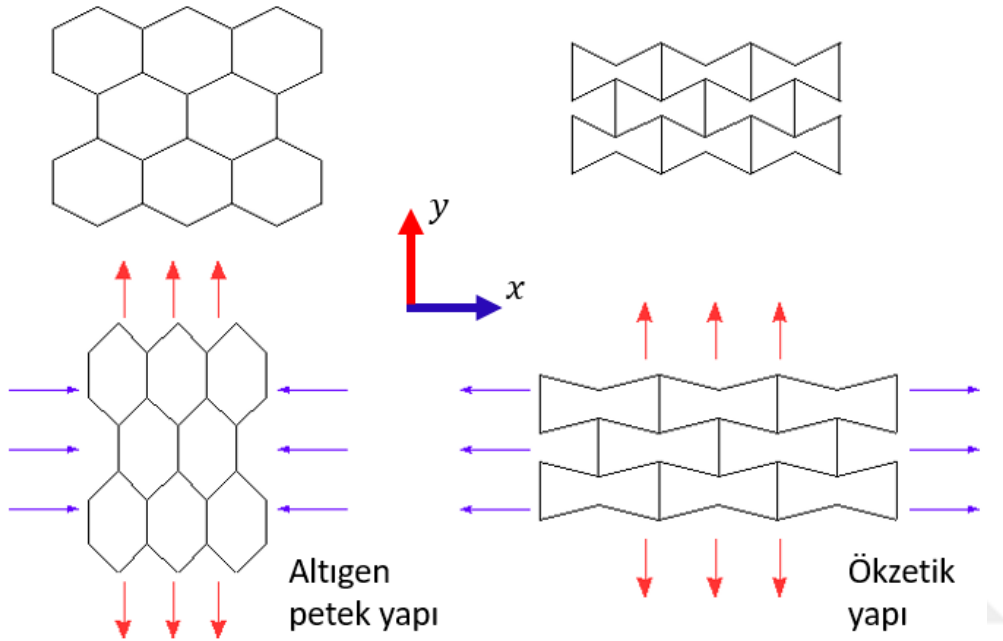
2. ÖKZETİK MALZEME VE YAPILAR

Poisson etkisinin bir ölçüsü olarak ν olarak gösterilen ve Siméon Denis Poisson'un (1787-1840) adıyla anılan Poisson oranı, bir malzemeyi karakterize etmek için kullanılır; bu, malzemelerin basma gerilmesinde etkisinde gerilim yönüne dik yönlerde genişleme meydana gelirken çekme gerilmesi altında yapıda enine kesitte daralma meydana gelir. Poisson elastik yükleme yönlerinde enine gerinme e_t ve boyuna gerinme e_l arasındaki ν oranını $\nu = -\varepsilon_t/\varepsilon_l$ olarak tanımlamıştır. İzotropik malzemelerde, ν , boyut ve şekildeki değişimle ilgili olarak ifade edilebilen bulk modülü B ve kayma modülü G tarafından da sunulabilir [70]: $\nu = [3(B/G - 2)]/[6(B/G + 2)]$. Bu denklem, izotropik hacimli malzemeler için Poisson oranının sayısal sınırlarını şu şekilde tanımlar, $0 \leq B/G < \infty$ için $-1 \leq \nu \leq 0.5$ olarak tanımlar. Bu aralık, sıvılar ve kauçuklar gibi kompakt, neredeyse sıkıştırılmaz malzemelerden başlayarak, stresin esas olarak şekil değişikliğine neden olduğu ve ν 'nin 0.5'e yaklaştığı durumları içerir [71]. En yaygın bilinen malzemeler için Poisson oranı genellikle 0 ile 0.5 arasında bulunur. Örneğin, metaller ve polimerler için bu değer genellikle 0.25 ile 0.35 arasındadır. Camlar ve mineraller daha sıkıştırılabilir ve bu malzemeler için Poisson oranı genellikle $\nu \rightarrow 0$ 'dir. Gazlar ve mantarlar için ise $\nu = 0$ 'dır. Bazı polimer köpükler ve belirli metalik kristallerde ise ν 'nin negatif olduğu durumlar gözlemlenebilir.

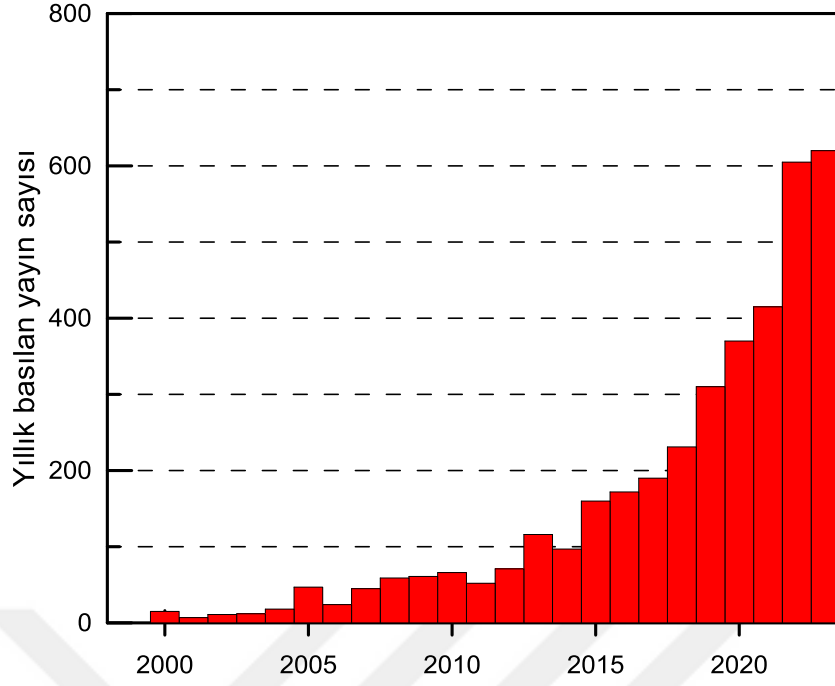
Geçmiş 1987 yılına kadar uzanan Lakes [48], negatif Poisson oranına (NPO) sahip davranış sergileyen köpük yapı rapor etmiştir. Sonrasında ise Evans ve arkadaşları [72] tarafından “NPO” uzun tanımını basitleştirmek amacıyla bu malzeme yapısını 'ökzetik (auxetics)' olarak adlandırmıştır. Dolayısıyla, literatürde kısa negatif Poisson oranlı yapılar genellikle ökzetik olarak adlandırılmaktadır.

Tipik mekanik metamateryaller, NPO, negatif sıkıştırılabilirlik (NS) veya negatif normal gerilme gibi negatif indekslere sahip malzemelerdir [73]. Mekanik metamateryallerin en çok çalışılan dallarından biri olan ökzetik malzemeler, deformasyon sırasında beklenenin aksine deformasyon davranışı sergiler. Daha spesifik olmak gerekirse, tek eksenli basma yükü (çekme) altında, geleneksel

malzemeler uygulanan yüke dik yönlerde genişler (büzülür) gösterirler. Buna karşılık, ökzetik malzemeler Şekil 2.1'de gösterildiği gibi tek eksenli basma (çekme) yükü altında enine yönde büzülür (genişler). Bu sıradışı mekanik davranıştan kaynaklanan çok sayıda çalışma, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi yayın sayısından (Scopus arama motoru) kolayca görülebileceği gibi, artan sayıda araştırmacıyı ökzetik malzemeler ve yapılar alanına çekmektedir.



Şekil 2.1. Çekme ve basma yükleri altındaki (a) Klasik (b) Ökzetik malzemelerin davranışları.



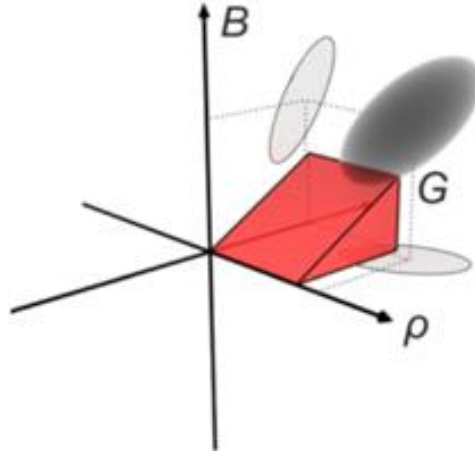
Şekil 2.2. 2000'den bu yana her yıl negatif Poisson oranlı yapılar konusunda yapılan yayın sayısı (Veriler Scopus arama motorundan elde edilmiştir).

Sıkıştırma ve çekme altında alışılmadık deformasyon modelinin eşlik ettiği ökzetik malzemeler ve yapılar, üstün hasarlanma direnci [74], yük taşıma kabiliyeti [75, 76], çatlak ilerlemeye karşı direnç ve daha iyi enerji absorbe etme performansı [77-79], gibi arzu edilen birçok malzeme özelliğine sahiptir.

2.1. Hücresel Ökzetik Yapılar

İçi dolu malzemelere kıyasla, hücresel malzemeler düşük yoğunluk, yüksek enerji absorbe etme yeteneği, yüksek akustik izolasyon ve sönümleme, filtreler vb. gibi çok sayıda üstün mekanik ve termal özelliğe sahiptir.

Ökzetik malzemelerin Milton-Ashby haritası (bulk modülü (B), kayma modülü (G) ve yoğunluk (ρ)), şekil 2.3'de gösterildiği gibi sıradan klasik ile ökzetik malzemeler arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılabilir. Siyah elipsler sıradan klasik malzemelerin özellik alanını, kırmızı uzay ise ökzetik hücresel malzemelerin özellik alanını göstermektedir [80]. Düşük yoğunluklu malzemelerin özellikleri temel olarak hücresel konfigürasyonlarına ve temel malzemenin özelliklerine bağlıdır.



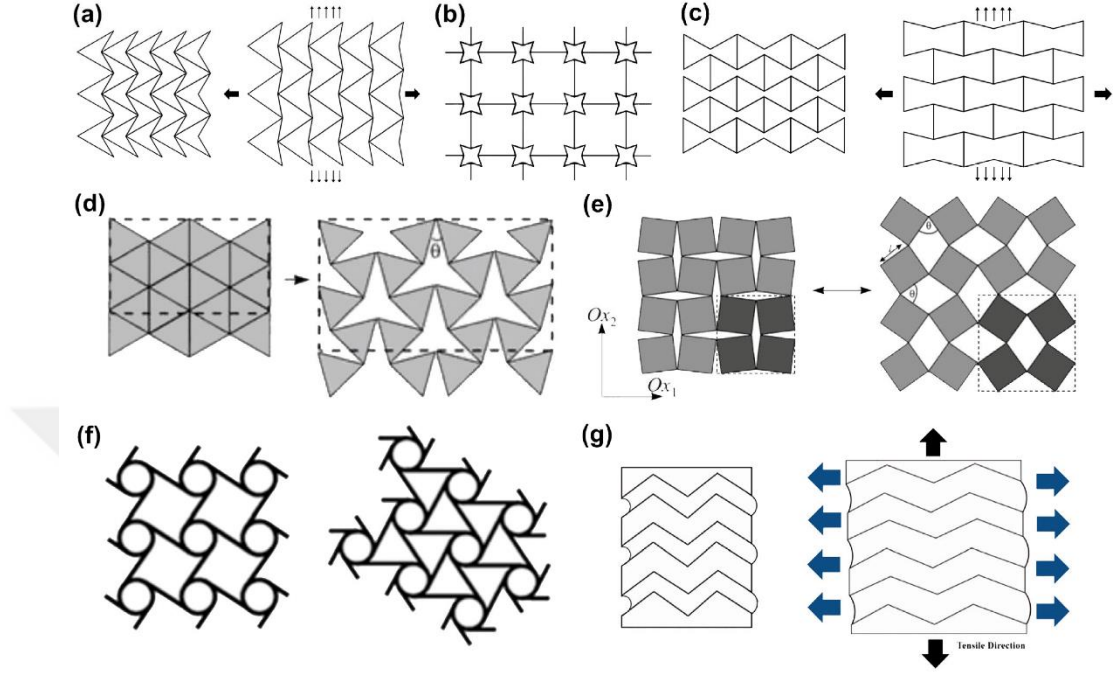
Şekil 2.3. Ökzetik malzemelerin Milton-Ashby haritası. B bulk modülünü, G kayma modülünü ve ρ kütle yoğunluğunu temsil eder [80].

Körner ve Liebold-Ribeiro'nun [44] çalışmasında, öz mod analizine dayalı olarak ökzetik hücresel malzemelerin tanımlanmasına yönelik sistematik bir yaklaşım önerilmiştir. Bu bağlamda, farklı hücresel mimariye sahip hücresel ökzetik malzemelerin ve yapıların özelliklerini göstermek incelemeler yapılmıştır.

2.1.1. Ökzetik yapılar

Ökzetik malzemeler, sıradan malzemelerden üstün birçok özellik sergileyerek hava ve uzay sanayi, otomotiv, askeri, tıbbi ve günlük koruma alanlarında büyük uygulama alanlarına çözüm sunmaktadır [81-83]. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, şimdiye kadar bulunan ve geliştirilen ökzetik yapılar temel olarak sigma yapılar, dönen yapılar, kiral yapılar [84], katlanabilir yapılar [85] vb. içerir. Taban kenar uzunluğu içeri doğru yönelmiş üçgen yapı (Şekil 2.4(a)), herbir kenarı içeri kıvrılmış yıldız kare yapı (Şekil 2.4b) ve eğimli kolları içeri doğru yönelmiş altıgen yapı (Şekil 2.4(c)) gibi yapıların ökzetik davranışı, içbükey uzunlukların düzleşmesinden (genişlemesinden) türetilmiştir. Görünüşe göre, tüm yapı yanal veya uzunlamasına gerilime maruz kaldığında, içbükey uzunlukların düzleşmesi diğer yönde genişlemesine neden olur. Dönen bir yapıdaki rijit üçgenler (Şekil 2.4(d)) veya kareler (Şekil 2.4(e)) sadece belirlenen köşelerden bağlanır. Yapı düzlemde gerildiğinde, üçgenler veya kareler bu bağlantı noktaları etrafında dönerek yapıya negatif Poisson etkisi kazandırır. Kiral yapılarda (Şekil 2.4(f)), kiral birimlerin düz kenarları bir daire veya diğer geometrik şekillerin merkezi bir düğüme bağlanır ve ökzetik etki, dış kuvvet altında düğümlerin etrafındaki kenarların serbest bırakılmasıyla elde edilir [86]. Buna karşılık, katlanmış yapının (Şekil 2.4(g)) ökzetik davranışı sadece katlanmış parçaların

genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu yapılara dayalı olarak, ökzetik polimerler [87-89], ökzetik kompozitler [90, 91], ökzetik tekstiller [92, 93] vb. dahil olmak üzere çeşitli yapay ökzetik malzemeler ve yapılar geliştirilmiştir.



Şekil 2.4. Ökzetik yapılar: (a) Re-entrant üçgen yapı, (b) Re-entrant yıldız yapı, (c) Sigma (re-entrant altıgen) yapı, (d) Dönen üçgen, (e) Dönen kare ve (f) Kiral yapı [84], (g) Katlanabilir yapı [85].



3. SONLU ELEMENLAR METODU

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), karmaşık yapıların analizi ve çözümü için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bu metod, bir yapının matematiksel modelini oluşturmak ve bu modeli sayısal çözümle incelemek için geliştirilmiştir. Mühendislik tasarım çalışmaları, deplasmanlar, gerilmeler, doğal frekanslar, sıcaklık dağılımları gibi faktörleri öngörmeyi gerektirir. Bu parametreler, malzeme özellikleri ve/veya geometri üzerinde iterasyon yapmak için kullanılır. Geleneksel yöntemler, genellikle elle yapılan hesaplamalar gibi, fiziksel modellerin idealize edilmesi ve basit denklemler kullanılması gerektirir. Ancak, bu yaklaşımlar genellikle problemin karmaşıklığını basitleştirerek sade tahminler sunmaktadır. SEY ve diğer sayısal yöntemler ise mühendislik analizlerinde çok daha ayrıntılı bir yaklaşımı amaçlamaktadır. SEY, ilgili alanı küçük parçalara böler ve bu elemanların sınırları boyunca sürekli yer değiştirmeler sağlar. Bu sayede, daha gerçekçi ve detaylı sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır.

SEY temel adımları aşağıdaki gibi özetlenirse;

Yapının Bölünmesi: Yapı, sonlu elemanlar adı verilen küçük parçalara bölünür. Elemanlar genellikle üçgen, dörtgen, tetrahedral veya hexahedral gibi geometrik şekillere sahiptir.

Matematiksel Modellendirme: Her bir sonlu elemanın matematiksel modeli oluşturulur. Mekanik davranışı ifade eden diferansiyel denklemler kullanılır.

Sınır Koşulları ve Yüklerin Belirlenmesi: Yapının sınır koşulları belirlenir (sabitlenmiş noktalar, destek noktaları vb.). Yapı üzerine etki eden kuvvetler, basınçlar, sıcaklık değişiklikleri gibi yükler tanımlanır.

Denklem Sistemi Oluşturma: Her bir sonlu elemanın katkısını içeren bir denklem sistemi oluşturulur. Bu sistem genellikle büyük bir matris denklemi olarak ifade edilir.

Sayısal Çözüm: Denklem sistemi sayısal yöntemlerle çözülerek yapının davranışı elde edilir. Deplasmanlar, gerilmeler, sıcaklık dağılımları gibi çeşitli parametreler hesaplanır.

Sonuçların Değerlendirilmesi: Analiz sonuçları, yapısal mukavemet, şekil değişimleri, gerilme dağılımları gibi önemli parametreleri değerlendirmek için kullanılır.

Sonlu Elemanlar Metodu, gerçek dünya problemlerini çözmek ve karmaşık yapıların analizini yapmak için etkili bir araçtır. Bu yöntem, mühendislerin tasarım süreçlerini optimize etmelerine, malzeme seçimlerini yapmalarına ve yapısal performansı değerlendirmelerine yardımcı olur.

3.1. Elastik ve Elasto-Plastik Analizler

Elastik, plastik ve yapısal deformasyonlar, malzemelerde meydana gelebilen deformasyon türleridir, ancak özellikleri ve davranışları açısından farklılık gösterirler.

3.1.1. Elastik analiz

Elastik analiz, yapıların tasarlanmasında kullanılan en basit ve en yaygın yaklaşımdır. Bu yaklaşım, yapının elastik olarak davrandığını, yani bir yük kaldırıldıktan sonra orijinal şekline dönebileceğini varsayar ve yalnızca küçük deformasyonlar yaşaması beklenen yapılar için uygundur. Elastik analiz, gerilme ve şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan doğrusal elastik teori kullanılarak iç kuvvetlerin ve deformasyonların değerlendirilmesini içerir. Elastik analiz, lineer olmayan analizler gibi birçok farklı parametrelerin tanımlanmasına ihtiyaç duymazlar.

3.1.2. Elasto-Plastik lineer olmayan analiz

Elastik olmayan analiz, yapının önemli deformasyonlara uğraması beklendiğinde veya tasarım yükü malzemenin elastik sınırının ötesinde olduğunda kullanılır. Elastik olmayan analiz, malzemenin doğrusal olmayan davranışını dikkate alan doğrusal olmayan analiz kullanılarak iç kuvvetlerin ve deformasyonların değerlendirilmesini içerir. Bu yaklaşım, yapının elastik sınırın ötesindeki tepkisini analiz etmek için kullanılabilir, ancak akma sonrası momentlerin yeniden dağılımını dikkate almaz.

Fakat, Elasto-Plastik analiz ise akma sonrası momentlerin yeniden dağılımını dikkate alan bir tasarım yaklaşımıdır. Elasto-Plastik analiz ile bir yapı, nihai yük seviyesinde önceden seçilmiş bir akma mekanizması oluşturacak şekilde tasarlanabilir ve bu da aşırı olaylar sırasında bilinen ve önceden belirlenmiş bir tepkiye yol açar. Bu yaklaşım, elastik ve elastik olmayan analizlere göre çeşitli avantajlar sunar ve büyük deformasyonlara uğraması beklenen yapılar için uygundur.

4. ÇOK HÜCRELİ İNCE CİDARLI KİRİŞ YAPILARIN TASARIMI

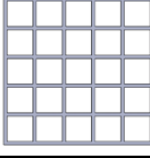
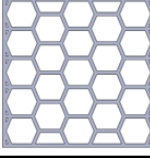
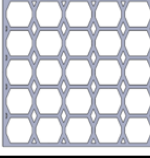
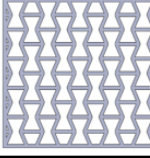
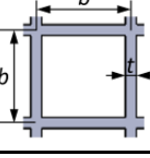
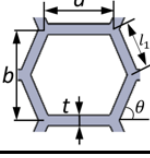
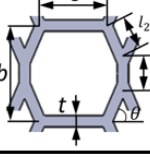
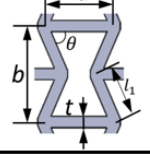
Petek yapılar özellikle havacılık, uzay, ve otomotiv başta olmak üzere bir çok mühendislik uygulamaları için sıkça tercih edilmektedir. Bunun nedeni, yüksek rijitlik ve dikkate değer özgül dayanım oranları gibi dikkat çeken özelliklerinin yanı sıra belirli bir enerjiyi verimli bir şekilde absorbe etme konusundaki olağanüstü yetenekleridir. Ayrıca içi boş kiriş yapılara göre iyi bir hasar toleransı sunarları sayesinde genellikle darbe eşliğinde oluşan bir hasardan sonra işlevselliğinin korunmasının kritik olduğu durumlarda kullanılır. Doğadan ilham alınarak üretilen bu çok hücreli petek yapılar, malzeme yoğunluğuna özgü elastik özellikler ile hasar toleransı ve/veya tokluk arasında mükemmel bir korelasyona sahiptir. Asıl soru, bu yapıların elasto-plastik bölgedeki hasar toleransını yapısal işlevlerini kaybetmeden iyileştirmenin mümkün olup olmadığıdır.

Literatürde, ökzetik ve ökzetik olmayan petek sahip kiriş kesitli yapıların eğilme davranışı üzerine yeterince araştırmanın yapılmadığı anlaşılmıştır. Bu çalışma, kesiti farklı petek yapılardan oluşan ince cidarlı kiriş yapıların eğilme performansını ve hasar deformasyonu sistematik olarak incelenmiştir. Ökzetik yapısının eğme yükü altındaki deformasyon davranışı belirlenmesinde üç noktalı eğilme testlerinden yararlanılmıştır. Çalışmada aynı geometrik parametrelere sahip kare, altıgen ve sekizgen gibi farklı çok hücreli peteğe sahip ince cidarlı kiriş yapılar ele alınmıştır.

4.1. Kesiti Ökzetik ve Ökzetik Olmayan Kiriş Yapıların Tasarımı

Yaygın olarak bulunan ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilen içi boş tüp, baz (BT) yapı yanı sıra dikkate alınan kesitler kare (Kare), altıgen (6gen) ve sekizgen (8gen) ve ökzetik petek (Aux) (Şekil 4.1’de gösterildiği gibi), eğilme davranışları incelenecektir. Aux kiriş, NPO’lu hücrelerin sistematik olarak kiriş kesitine yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Bütün kiriş yapılar sabit bir $L = 150$ mm uzunluğa ve sabit bir $H = 21.5$ mm yüksekliğe ve genişlik boyutu W ise hücre boyutlarında dolayı ihmal edilecek kadar farklılık göstermesine rağmen Aux kiriş için 22.1 mm olarak hesaplanmıştır.

Kiriş yapıların adaletli bir şekilde karşılaştırma sunması için her bir kiriş yapının dış cidar kalınlığı $t = 0.5 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.

Deney Numuneleri	Boş Tüp (BT)	Kare	Altıgen (6gen)	Sekizgen (8gen)	Ökzetik (Aux)
Kesit geometrisi					
Birim hücre tanımı	—				
Boyutlar	—	$b = 4.2 \text{ mm}$ $t = 0.5 \text{ mm}$	$a = 3.2 \text{ mm}$ $b = 4.2 \text{ mm}$ $l_1 = 2.28 \text{ mm}$ $t = 0.5 \text{ mm}$	$b = 4.2 \text{ mm}$ $c = 2.92 \text{ mm}$ $l_2 = 1.78 \text{ mm}$ $l_3 = 0.93 \text{ mm}$ $t = 0.5 \text{ mm}$	$a = 3.2 \text{ mm}$ $b = 4.2 \text{ mm}$ $l_1 = 2.28 \text{ mm}$ $t = 0.5 \text{ mm}$
Kiriş yapıların kütlesi	51.12 gr	145.8 gr	161.57 gr	179.66 gr	240.04 gr

Şekil 4.1. Boş tüp ve çok hücreli kiriş yapılarının kesit geometrisi ve boyutları. Kiriş ana boyutları ve tek hücre yükseklikleri aynı olduğunu dikkat ediniz.

4.2. Ökzetik Kirişlerde Farklı Hücre Açısı ve Cidar Kalınlığı Tasarımı

Şekil 4.2(a)'da görselleştirilebileceği gibi, ökzetik kesitli kiriş yapının eğilme performansı incelenmiştir. Kiriş kesiti, ökzetik hücrelerin periyodik olarak düzenlenmesi ile üretilmiştir. Detaylı boyutsal parametreler Tablo 4.1'de sunulmuştur. "a" uzunluğu ökzetik hücrenin genişliğidir ve ayrıca sırasıyla "c, l" ve "t" ise ökzetik hücrenin eğimli hücre kolları arasındaki mesafe, eğimli hücre kolu uzunluğu ve hücre cidarı kalınlığını ifade etmektedir. "A" kiriş yapısı sabit $L = 150 \text{ mm}$ uzunluğuna ve sabit $H = 21.5 \text{ mm}$ yüksekliğe sahiptir, ancak genişlik "W" boyutu ökzetik hücre konfigürasyonunun boyutuna göre tanımlanmıştır. Şekil 4.2(a), Aux kiriş yapısının geometrik özelliklerini göstermektedir. Parametrik çalışma kapsamında, aynı bağıl yoğunluğa ($\bar{\rho} = 0.485$) sahip olacak şekilde tasarlanan modeller, Şekil 4.2.(b)'de verilen hücre kol açısının (θ) dört farklı değeri (55, 65, 75 ve 85 derece) için oluşturulmuştur. Ayrıca, ökzetik kiriş yapının hücre kol kalınlığının fonksiyonel olarak kesitte derecelendirilmesiyle yapının eğilme yükü altında mekanik özellikleri

inceleneyecektir. Bundan dolayı, Şekil 4.2.(c)'deki kesitte gösterildiği gibi, cidar kalınlığının “ t ” tarafsız ekseninden üst ve alt yüzeylere doğru kademeli olarak artırıldığı üç farklı durum belirtilmiştir. “ t_g ” kalınlığı ise cidar kalınlığının ortalama değerini göstermektedir.

Kiriş yapılarda eğilme yükü altında, mandrele yakın hücreler basma gerilmesine maruz kalırken, tarafsız eksenin altındaki hücreler çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, Poisson oranını ölçmek için Aux'un kesitlerindeki karakteristik düzlemler ve noktalar seçilmiştir. Şekil 4.2(a)'da kiriş kesitinin boyutları verildiğinden, kesitteki şekil değişikliği ile kesitteki deformasyon miktarı düzlemlerde farklılık göstermektedir. Her hücre satırında meydana gelen değişim farklı olacaktır. Bu nedenle, Poisson oranı her hücre satırı için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Ancak genel olarak Poisson oranı hesaplaması aşağıdaki denklem setleri ile analiz edilir.

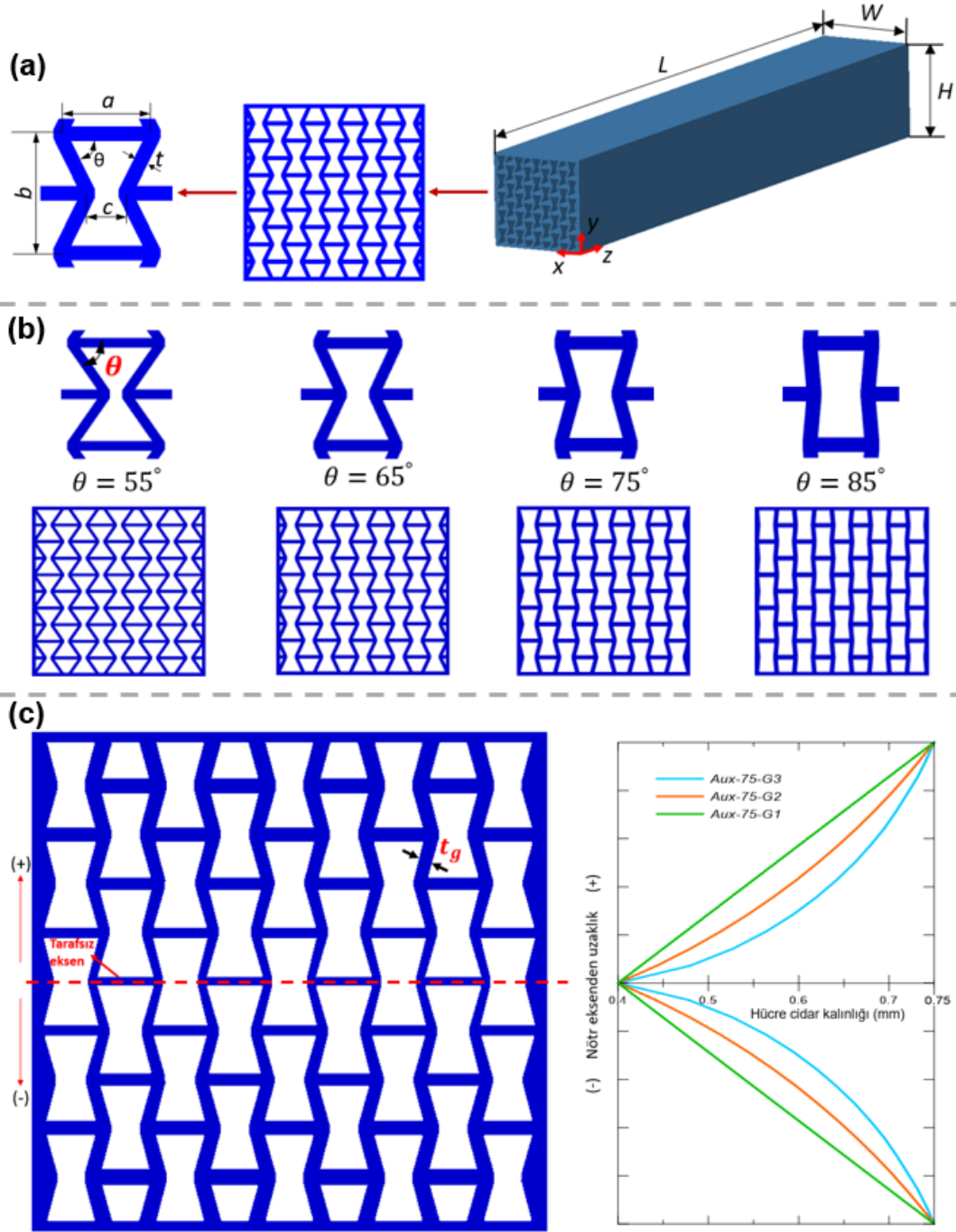
$$\varepsilon_{xi} = \frac{\Delta W_i}{W}, \varepsilon_y = \frac{\Delta H}{H} \quad (4.1)$$

Burada, W_i kiriş kesitinin ilgili satırının genişliği ve H ise kiriş kesitinin yüksekliğidir.

$$v = -\frac{\varepsilon_{xi}}{\varepsilon_y} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1'deki ifadeler eşitlik 4.2'de yerine yazılırsa, yeni ifade aşağıdaki gibi olur.

$$v = -\frac{\Delta W_i/W}{\Delta H/H} \quad (4.3)$$



Şekil 4.2. Aux kirişinin geometrik yapısı ve tasarımı (a) Birim hücre ile kiriş yapısı, (b) Hücre ve kesitteki farklı hücre kolu açılarının gösterimi, (c) Kiriş kesitinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlık.

Ökzetik hücre yapılarının boyutları "ökzetik hücre kol açısı θ , hücre cidar kalınlığı t olarak belirtilmiştir. Sabit kiriş uzunluğu nedeniyle, Aux yapısının geometrik parametreleri mantıksal olarak W ve H uzunluğunu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

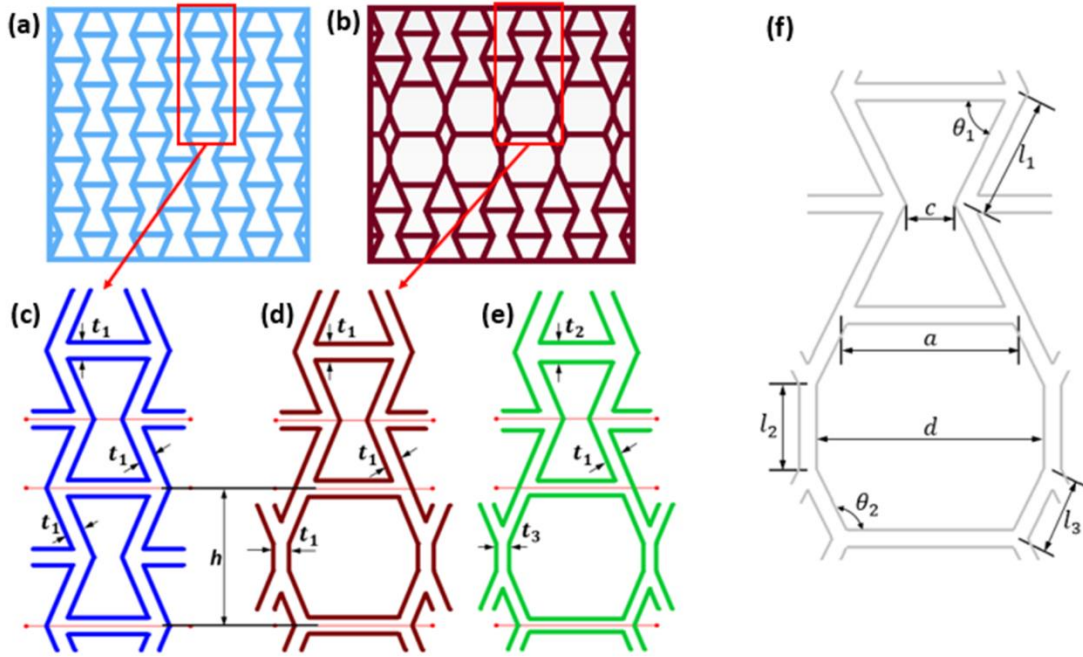
D. Zheng ve ark. [94] bağıl yoğunluğun çok hücreli yapıların tasarımında en önemli parametre olarak kabul edildiğini belirtmiştir. Wu ve ark. [95] bağıl yoğunluk

değişiminin yapıların NPO ile deformasyon davranışını etkilediğini belirtmiştir. Aux'un birim hücre konfigürasyonunun bağıl yoğunluğu denklem 4.4'de aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{\rho} = \frac{(3a + 4l)t}{(a + c)(2l \sin \theta)} \quad (4.4)$$

4.3. Hibrit Kesite Sahip Kiriş Yapıların Tasarımı

Bu kısımda, daha önce sunulan ökzetik yapının yanında kesiti hibrit geometrilerden oluşan kiriş yapılar tasarımı ele alınacaktır. Üç numune grubu, Aux (Ökzetik), AuxOcta (geleneksel ökzetik ve sekizgen hücrelerden oluşan hibrit yapı) ve AuxOcta-G (AuxOcta'nın dereceli yapısı) hücre yapılarına sahip kiriş yapıların, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi eğilme davranışı analiz etmek için özgün kiriş kesiti tasarlanmıştır. Ökzetik ve sekizgen hücrelerin periyodik düzenlemesi kirişin kesit alanını elde etmiştir. Aux kiriş, negatif Poisson oranına sahip hücrelerin sistematik olarak kesite yerleştirilmesiyle elde edilmiştir (Şekil 4.3(c)). AuxOcta ve AuxOcta-G kiriş yapıları, sırasıyla Şekil 4.3(d, e)'de görülebileceği gibi, hem ağırlığı hafifletmek hem de kesit atalet momentini artırmak için orta bölgede sekizgen hücre geometrisi kullanılırken, kesitin alt ve üst bölgelerinde bulunan ökzetik hücrelerden oluşan benzersiz bir tasarıma sahiptir.



Şekil 4.3. Kesiti ökzetik ve sekizgen petek yapılardan oluşan ökzetik ve hibrit kiriş yapıların geometrik tasarımları: (a) Aux kesitin geometrik gösterimi, (b) Hibrit kesitin geometrik tasarım, (c) Aux kiriş yapıda ökzetik hücreye ait kalınlık bilgisi, (d) AuxOcta ve (e) Kademeli hibrit (optimize edilmiş AuxOcta yapısında hücre cidar kalınlıkları değişiklik gösterir) hücre konfigürasyonu, (f) 2D hibrit sistemin birim hücre geometrik konfigürasyonu.

Ökzetik ve sekizgen hücre yapılarının geometrik parametreleri, kiriş yapısının boyutsal gereksinimlerine göre tanımlanmıştır. Detaylı geometrik parametreler Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Deneysel testte kullanılan çok hücreli kirişler için geometrik parametreler.

Yapı	a (mm)	h (mm)	c (mm)	d (mm)	t (mm)	Ağırlık (gr)
Aux	3.2	4.2	1.4	-	t ₁ :0.5	241.8
AuxOcta	3.2	4.2	-	4.6	t ₁ :0.5	219.6
AuxOcta-G	3.2	4.2	-	4.6	t ₁ :0.5, t ₂ :0.6, t ₃ :0.4	224.4

Birbirini 180 dereceye tamamlayan açılarla ilgili trigonometrik eşitlikler incelendiğinde tamamlayıcı açılarının sinüsleri birbirine eşit olduğu belirtilir. Tamamlayıcı açılarının sinüsleri birbirine eşittir. Eşitlik $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$ olduğundan

dolayı, $\sin \theta_1 = \sin \theta_2$ olduğu söylenebilir. Verilen bağıntı AuxOcta'nın yapısal geometrisini karşılayabilir:

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 = \sin \theta \quad (4.5)$$

$$2l_1 \sin \theta = l_2 + 2l_3 \sin \theta = h \quad (4.6)$$

$$a + 2l_3 \cos \theta = d \quad (4.7)$$

Ayrıca, Aux ve AuxOcta birim hücre konfigürasyonunun bağıl yoğunluğu sırasıyla eşitlikler (2.8) ve (2.9)'da aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\bar{\rho}_i = \frac{(3a + 8l_1)t_1}{a(4l_1 \sin \theta)} \quad (4.8)$$

$$\bar{\rho}_{ii} = \frac{(3a + 4l_1 + 2l_2 + 4l_3 + 3(l_1 + l_3) \cos \theta)t_1}{(a + 2l_3 \cos \theta)(l_2 + 2l_3 \cos \theta + 2l_1 \sin \theta)} \quad (4.9)$$



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında, ökzetik ve ökzetik olmayan kesite sahip kiriş yapıların üç nokta eğme yükü altındaki davranışlarının detaylı incelenmesi ve elde edilen bulgular çerçevesinde hem yük taşıma kabiliyeti hemde enerji absorbe etme yeteneği geliştirilecek şekilde yüksek kesit atalet momentine sahip ayrıca deformasyon kontrollü kiriş yapıların geliştirilmesi sistematik olarak ele alınmıştır.

Bu bölümde, deneysel, nümerik ve teorik çalışmalar hakkında bilgi verilmiş, bu kapsamda kiriş yapıların üretim yöntemi, deneyde kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, deney düzenekleri ve oluşturulan sonlu elemanlar modelleri konuları üzerine değinilmiştir.

5.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme ve Üretim Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi modelinin doğrulama çalışmaları ve deformasyon davranışlarını incelemek için kiriş numunelerin imal edilmesi planlanmıştır. Kiriş yapılar, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezinde (ALUTEAM) EOS M 290 cihazında 316L paslanmaz çelik malzemesi kullanılarak imalat yapılmıştır.

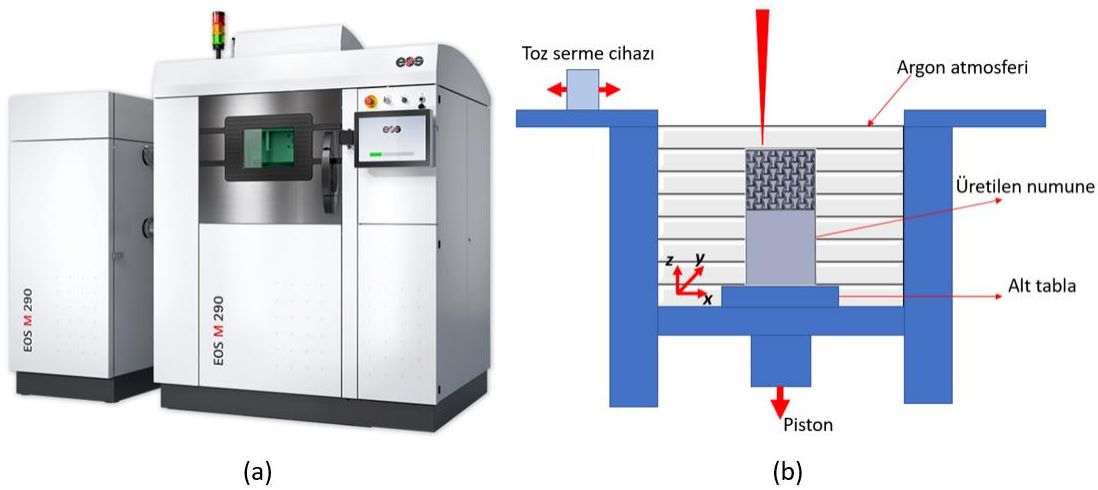
5.1.1. Üretim yöntemi

Doğrudan Ergitme Lazer Sinterleme (DMLS), doğrudan CAD verilerinden gerçek şekline yakın parçalar oluşturmak için kullanılan bir katmanlı imalat (Kİ) yöntemidir [96-98]. Süreç, bir lazer kaynağı kullanarak farklı malzeme katmanlarının eritilmesini ve kaynaştırılmasını içerir. Odaklanmış bir lazer ışını, toz yatağının yüzeyini seçici olarak tarar ve parçayı katman katman oluşturmak için toz parçacıklarını birleştirir [99]. DMLS'de konsolidasyon, toz partiküllerinin füzyonu veya difüzyon bağı yoluyla gerçekleşebilir. Bu teknik, hem polimerik hem de metalik malzemeler kullanılarak parçalar oluşturmak için kullanılmıştır [100]. Akrilonitril bütadien stiren (ABS), naylon, cam dolgulu naylon ve polikarbonat plastikler gibi polimerik malzemelerin yanı sıra düşük karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler, bakır ve süper alaşımlar gibi metalik malzemeler de kullanılabilir. DMLS, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen

parçalarınınkine yakın mekanik özelliklere sahip tamamen yoğun parçalar üretebilen bir üretim tekniğidir.

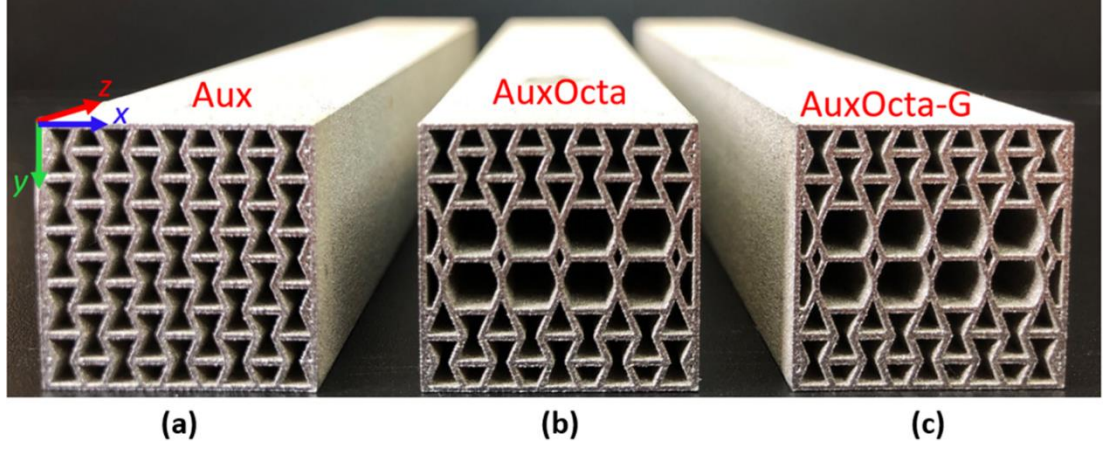
DMLS, malzeme ve şekillerdeki çok yönlülüğü sayesinde karmaşık şekilli metal bileşenleri tek bir adımda oluşturma avantajı sunar. Bununla birlikte, bazı dezavantajları gidermek için dikkatli bir süreç kontrolü uygulamak önemlidir. Proses, önemli iç gerilimlere ve parça bozulmalarına yol açabilen yüksek sıcaklık gradyanları ve yoğunlaşma oranları içerir. Ek olarak, eriyik havuzunda bilye ve cüruf oluşumu riski vardır ve bu da herhangi bir son işlem olmaksızın 8 ila 20 μm arasında değişen yüzey pürüzlülüğüne neden olur [101].

Karmaşık geometrik yapıları nedeniyle, DMLS eklemeli üretim yöntemi kullanılarak ökzetik ve hibrit kesitli kiriş yapılar üretilmiştir. Şekil 5.1(a ve b)'de üretim yapılan cihazın ve üretim prosesinin şematik gösterimi mevcuttur.



Şekil 5.1. DMLS üretim yöntemi: (a) EOS M290 üretim cihazı (b) DMLS üretimin şematik gösterimi.

Şekil 5.2'de DMLS yöntemiyle üretilen Aux ve AuxOcta kiriş yapılarını göstermektedir. Üç nokta eğme testlerinde yüksek eğme etkisine sahip olabilmek için kiriş uzunluğunun (L) kiriş kesit yüksekliğine (H) oranı altıdan fazla olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 5.2. 316L paslanmaz çelikten DMLS ile üretilen numuneler: (a) Ökzetik hücre kesiti geometrisine sahip kiriş, (b) Homojen cidar kalınlıklarına sahip hibrit geometriye sahip kiriş ve (c) Hücre cidar kalınlıkları optimize edilmiş hibrit kiriş yapı.

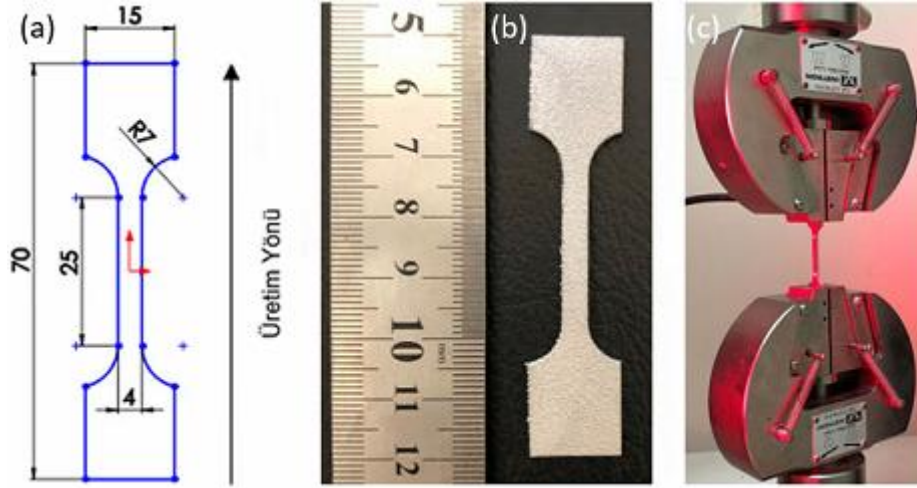
Deneyssel ve sayısal yöntemler kullanarak ökzetik hücrelerin basma davranışını doğru bir şekilde araştırmak ve yapıda negatif Poisson etkisinin gözlemlenebilmesi için, hücre kombinasyonunun sayısı hem yatay hem de enine yönlerde dörtten fazla olmalıdır [102]. Bundan dolayı, Aux ve AuxOcta kapsayan bütün çok hücreli kiriş yapıların hücre konfigürasyonu $N_x \times N_y = 5 \times 5$ olacak şekilde kiriş kesitine yerleştirilmiştir. Tüm kiriş yapıları paslanmaz çelik (316L) kullanılarak üretilmiştir. Katmanlı imalat uygulaması sırasında, üretim parametrelerinin etkisiyle hücre cidarlarının yüzey pürüzlülüğü yeterince pürüzsüz olmadığından, tasarlanan değer ile üretilen değer arasında fark olması kaçınılmazdır. Bu nedenle üretim parametreleri seçilirken yapısal tasarım geometrisine yakın üretim yapabilmek için kiriş geometrileri 20 mikronluk katmanlar halinde üretilmiştir.

5.1.2. 316L malzemesinin mekanik özellikleri

Deneyssel çalışmalarda kullanılan malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için DMLS yöntemiyle üretilen 316L malzemeden çekme numuneleri üretilmiştir. 316L paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de verilmiştir. Tek eksenli çekme testinde kullanılacak standart kemik numuneler, kiriş üretimi için kullanılan aynı parametrelerle üretilmiştir. Şekil 5.3(a)’da gösterildiği üzere ASTM E8/E8M-15a test standardına göre, çekme numunesi (Şekil 5.3(b)) 1 mm/dak sabit hız ile üç tekrarlı tek eksenli çekme testine tabi tutulmuştur (Şekil 5.3(c)).

Tablo 5.1. Metal 3B yazıcıda kullanılan 316L paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal bileşimi.

Element	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	C	Cr	Cu	N	S	P
Ağırlıkça yüzde içerik	Ana element	≤ %2	%2.25-3	%13-15	≤ %0.75	≤ %0.03	%17-19	≤ %0.5	≤ %0.1	≤ %0.01	≤ %0.025

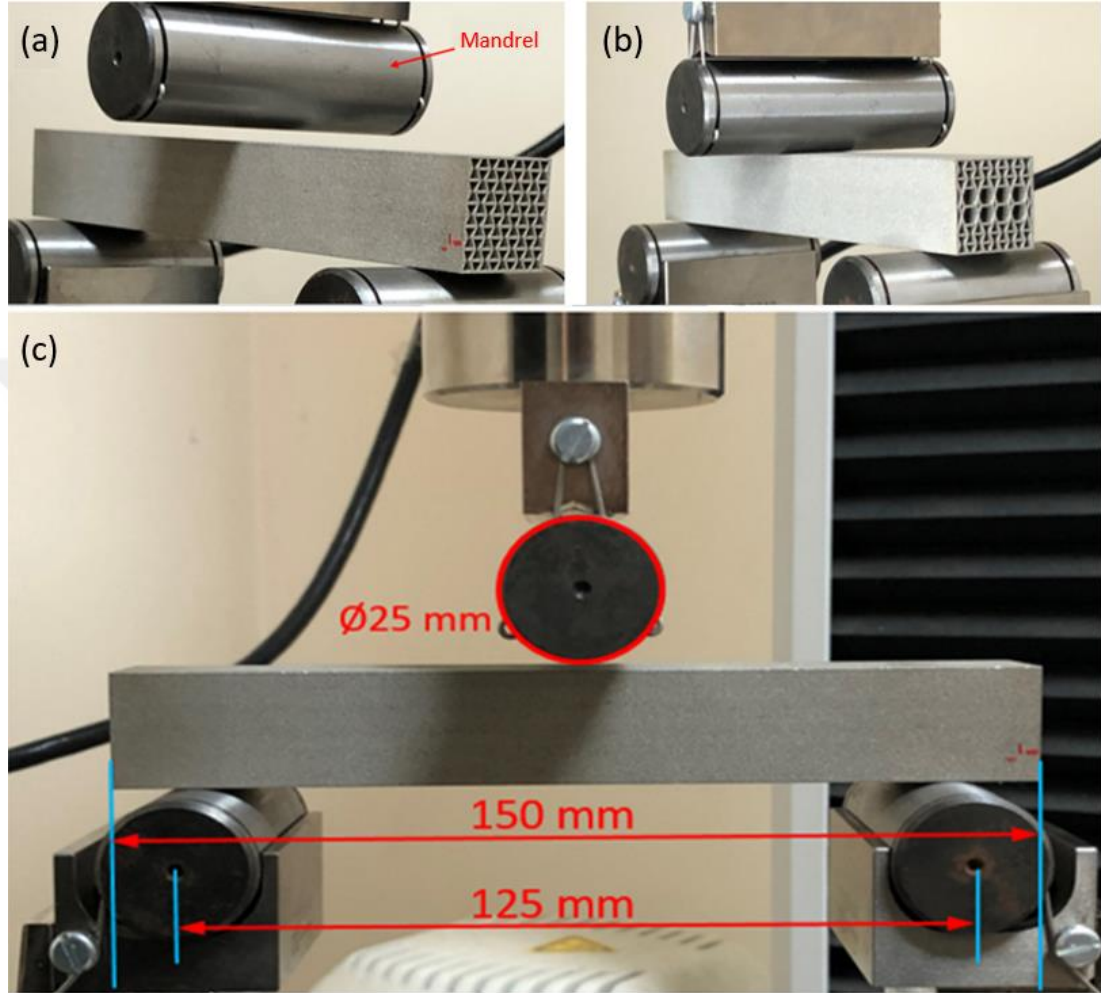


Şekil 5.3. (a) ASTM-E8 çekme test numunesi boyutları ($t = 2 \text{ mm}$), (b) DMLS katkılı üretim ile AISI 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme testi numuneleri, (c) video ekstansometre ile çekme testi düzeneği.

5.2. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testleri, ASTM 393 test standardına uygun olarak 30 kN yükleme kapasitesine sahip kalibre edilmiş bir universal cihazda (INSTRON 3367) gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'de gösterildiği gibi, numunelerin iki rijit destek üzerine yerleştirildiği deneysel eğme testinde, desteklerin ortasındaki bir mandrel tarafından 1 mm/dak sabit hızda tek eksenli bir basma kuvveti uygulanmıştır. Ökzetik ve sekizgen hücre yapısı nedeniyle, kiriş yapılarının uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 150 mm, 22,1 mm ve 21,5 mm'dir. Bu nedenle, iki destek arasındaki mesafe 125 mm'ye ayarlanmış ve mandrel ile iki desteğin çapları 25 mm olarak alınmıştır. Genel olarak, ökzetik, bal peteği veya kare çekirdekli kiriş yapılarında üç nokta eğilme testlerinde, düzenlenen maksimum basma deplasman değeri 20 mm'dir. Özgün bir tasarım yaklaşımı ile sunulan negatif Poisson oranına sahip kiriş kesitlerinde deformasyonların daha detaylı incelenebilmesi için nihai deformasyonun daha net gözlemlenmesi gerekmektedir. Kiriş kesitinde oluşan deformasyon modunun daha iyi analiz

edebilmek için nihai basma deplasmanını genişletmek faydalı olabilir. Bu nedenle, mandrelin nihai basma deplasman değeri tüm numuneler için 30 mm'ye ayarlayarak, ökzetik ve hibrit kesitli kirişin deformasyon modunu ve eğilme tepkisini sistematik olarak analiz etmek mümkündür.

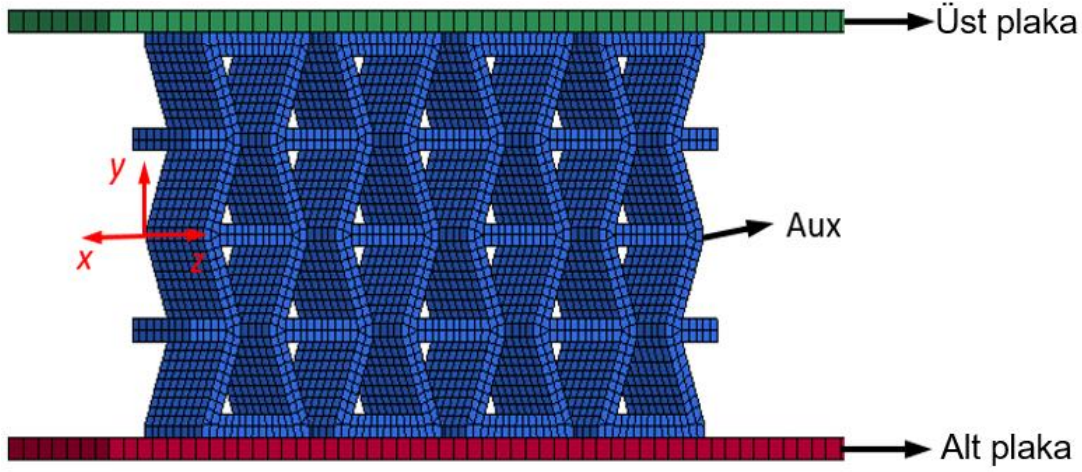


Şekil 5.4. Deneysel test düzeneği: (a) Negatif Poisson oranı hücreleriyle donatılmış kiriş kesitli Aux kiriş yapı, (b) Hibrit kesite sahip AuxOcta, ve (c) Üç nokta eğilme altında deneysel test düzeneğinin gösterimi.

5.3. Sonlu Elemanlar Modeli

5.3.1. Düzlem içi basma modeli

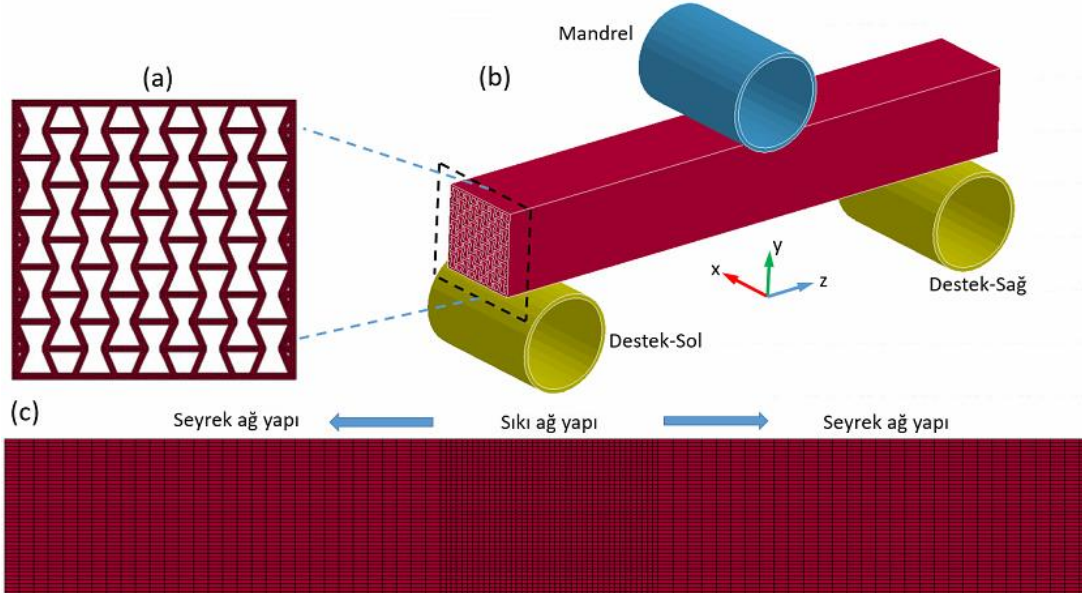
Mandrel'in hemen altındaki kesitteki yerel burkulma, kirişin yük taşıma kapasitesinde kritik bir rol oynadığından dolayı, kesitteki hücre deformasyonunu ayrıntılı olarak incelemek için düzlem içi basma modelleri oluşturulmuştur (Şekil 5.5). Kiriş kesitinin sahip olduğu geometriler teorik ve sayısal sonuçları irdelemek üzere sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 5.5. Basma yükü altında çok hücreli ökzetik yapının düzlem içi modeli.

5.3.2. Kiriş yapıların sonlu elemanlar modeli

Üretim sürecindeki kısıtlamalar ve sınırlı ekipman mevcudiyeti nedeniyle, NPO kesitli bir Aux kirişinin üç nokta eğilme testi üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma yapmak mümkün değildir. Sonuç olarak, LS-DYNA adlı doğrusal olmayan açık sonlu eleman kodlu, üç noktalı eğilme yüklerine maruz kaldığında ökzetik kesitin deformasyonunu ve mekanik özelliklerini incelemek için kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme testlerinde, Aux kirişi iki sabit destek arasına yerleştirilmiştir. Daha sonra, Şekil 5.6(a)'da gösterildiği gibi, rijit bir Mandrel "y" yönünde sabit hızda sıkıştırılmıştır.



Şekil 5.6. Aux'un sonlu eleman simülasyonu: (a) kirişin kesit alanı, (b) üç noktalı eğilme testinin modellenmesi, (c) "z" yönünde ökzetik kesitli kiriş yapısının ağ dağılımı.

Kum saati formülasyon (Hourglass) seçeneği 5 ile tam entegre katı elemanlar (ELFORM=2) kullanılmıştır. Kiriş malzeme modelini simüle etmek için MAT#24 (*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) uygulanmış ve malzeme özellikleri deneysel çekme testinde elde edilmiştir. Ayrıca, mandrel ve destek malzeme modelini tanımlamak için MAT#20 (*MAT_RIGID) malzeme modeli kullanılmıştır. Kesitteki ağ boyutunun doğruluğu ve verimliliği 0.25 mm'dir ve ağların kesit görünümü Şekil 5.6(b)'de belirtilmiştir. Şekil 5.6(c)'de görülebileceği gibi, uzunlamasına yönde, mandrel yakın Aux tüp kesiti 0.25 mm x 0.25 mm'lik nispeten ince bir ağ boyutu ile düzenlenmiştir; ancak başka bir bölgedeki ağ boyutu 0.25 mm x 1 mm'dir. Sıkı ağ yapısı bölümünün uzunluğu 30 mm'dir. 316L paslanmaz çeliğin gerinim hızı hassasiyetinden kaçınmak için sayısal simülasyonlarda gerinim hızı etkisi ihmal edilmiştir. Malzeme hatası, plastik birim şekil değiştirme hasar kriterini aştığında elemanların silinmesine izin veren MAT_ADD_EROSION kullanılarak modellenmiştir.

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, deformasyon nedeniyle özketik hücre cidarlarının temasını dikkate almak için tanımlanmıştır. *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, kiriş yapısı ile mandrel arasında ve kiriş yapısı ile destekler arasında kullanılmıştır.

Eğilme devam ederken, mandrel deforme olmuş kirişi iki destek arasında dikey olarak aşağı doğru iter. Kirişi daha fazla bükmek için gereken kuvvete ek olarak, kirişin üst yüzeyi ile girinti arasında oluşan sürtünmenin üstesinden gelmek için kuvvet kademeli olarak artar. Daha küçük sürtünme katsayıları ile plastik bölgedeki kuvvet-deplasman eğrisi daha küçük değerlere sahip olacaktır. Bu nedenle, statik ve dinamik sürtünme katsayıları tüm temas koşulları için 0.2 olarak ayarlanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde, gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen etkin plastik şekil değiştirme değeri ($\epsilon_{eff} = 0.571$) hasar kriteri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, Aux kiriş kesitinin deformasyon öncesi ve sonrası atalet momentlerini hesaplamak için SolidWorks 16 tasarım programı kullanılmıştır.

5.4. Eğme Davranışını Kıyaslama İçin Kullanılan Kriterler

Yapının üç nokta eğme elverişliliğini araştırmak için üç nokta eğme verimliliği göstergesini belirlemek çok önemlidir. Sun ve ark. [103] tarafından belirtildiği üzere, üç nokta eğilme performansı altında kiriş yapıların elverişliliğini niteliksel olarak

araştırmak için maksimum kuvveti (PLC), spesifik yük taşıma kabiliyeti (SYT), enerji absorbe etme (EA) ve spesifik enerji absorbe (SEA) etme kabiliyeti olmak üzere dört farklı parametre önerilmiştir. Bu çalışmada, ökzetik kirişlerin eğilmeye karşı dayanıklılığını değerlendirmek için aşağıdaki üç farklı parametre kullanılmıştır. Maksimum taşınan yük (PLC), yapının deforme olana kadar taşıyabileceği maksimum kuvvet olarak adlandırılır. Spesifik yük taşıma (SYT) kabiliyeti, parçanın taşıdığı maksimum kuvvetin kütleye oranlanmasıyla aşağı denklemdeki gibi hesaplanır.

$$SYT = \frac{PLC}{M} \quad (5.1)$$

EA, kuvvet-deplasman eğrisi dikkate alındığında, belirli bir deplasman değeri için kiriş yapı tarafından absorbe edilen enerjiyi gösterir. Dolayısıyla, EA şu şekilde açıklanabilir:

$$EA = \int_0^d F(y) dy \quad (5.2)$$

Burada $F(y)$ kiriş yapısı tarafından taşınan anlık yük, d ise mandrel in deplasman değeridir.

Birim kütle başına absorbe edilen enerji olarak tanımlanan spesifik enerji absorpsiyonu, genel olarak şu şekilde kullanılmıştır:

$$SEA = \frac{EA}{M} \quad (5.3)$$

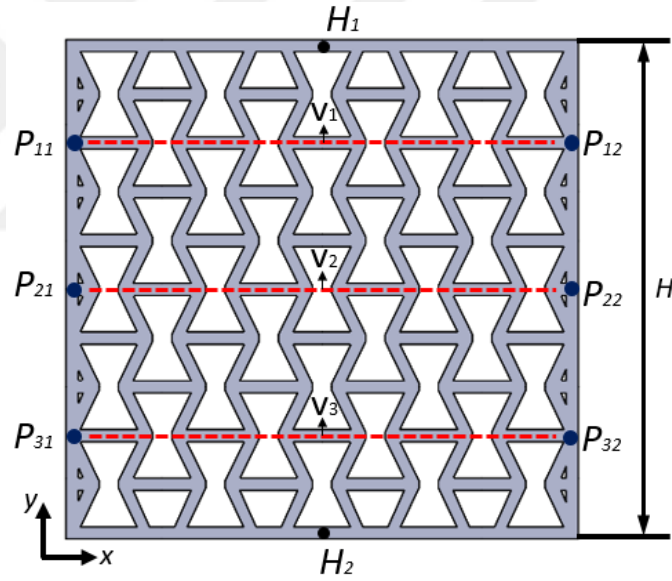
Üç nokta eğme deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasında öncelikli olarak farklı kesite geometrisine sahip yapılarda hasar meydana gelene kadar yükleme gerçekleştirilmiştir. Yapılarda hasar meydana gelene kadar taşıdığı kuvvet değerinin maksimum noktası seçilerek karşılaştırılması yapılması tartışmaya açık olacağından dolayı herbir kirişin ağırlığına oranlanarak taşıdıkları spesifik yük miktarı karşılaştırılacaktır. Aynı şekilde yapıların üç nokta eğme testi sırasında absorbe ettikleri spesifik enerji miktarları da yapıların karşılaştırılmasında belirli rol oynayacaktır.

5.5. Poisson Oranının Hesaplanması

Poisson oranının hesaplanmasında kesitte seçilen üç düzlem ($v_1 - v_3$) dikkate alınmıştır. Birim şekil değişimleri, düzlem üzerinde işaretlenen noktaların yer değiştirmeleri ölçülerek belirlenmiştir. Aşağıdaki denklem (Eşitlik 5.7) Poisson oranını hesaplamaktadır.

$$v = - \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_H} \quad (5.4)$$

Eğilme yüküne maruz kalan kiriş yapıları için, tarafsız eksenin üst kısmı basma gerilmesine maruz kalırken alt kısmın çekme gerilmesine maruz kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle, kesitin Poisson oranı yerel olarak tanımlanır. Şekil 5.8'de, bahsedilen üç düzlemde işaretlenen noktalara dayanarak, her iki yönde (enine ve dikey) (P_{11} - P_{12} , P_{21} - P_{22} ve P_{31} - P_{32}) mesafe değişimi kullanılarak şekil değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.7. Poisson oranını hesaplamak için kullanılan kirişin enine kesitindeki düzlemler ve noktalar.

Şekil değişimlerini hesaplamak için aşağıdaki denklemler (Denklem 5.8 ve 5.9) kullanılır.

$$\varepsilon_{V1x} = \frac{\Delta V_1}{V_1} \quad (5.5)$$

$$= \frac{(P_{12} - P_{11}) - (P_{12i} - P_{11i})}{(P_{12} - P_{11})} \quad (5.6)$$

burada v_1 , P_{11} ve P_{12} noktaları arasındaki orijinal uzunluktur. Δv_1 , P_{11} ve P_{12} arasındaki x koordinatındaki değişimi temsil eder. P_{ii} , P' 'nin gerçek zamanlı x koordinatıdır.

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta H}{H} \quad (5.7)$$

$$= \frac{(H_{1y} - H_{2y}) - (H_{1yi} - H_{2yi})}{(H_{1y} - H_{2y})} \quad (5.8)$$

burada, H kiriş kesitinin orijinal dikey uzunluğudur. Delta H , H_1 ve H_2 arasındaki y koordinatındaki değişimi temsil eder. H_i , H' 'nin gerçek zamanlı y koordinatıdır.

Her bir hattın Poisson oranının hesaplanması aşağıdaki şekilde elde edilmiştir;

$$v_a = \frac{\varepsilon_{va}}{\varepsilon_H} f(a) = \{a = 1, 2, 3\} \quad (5.9)$$

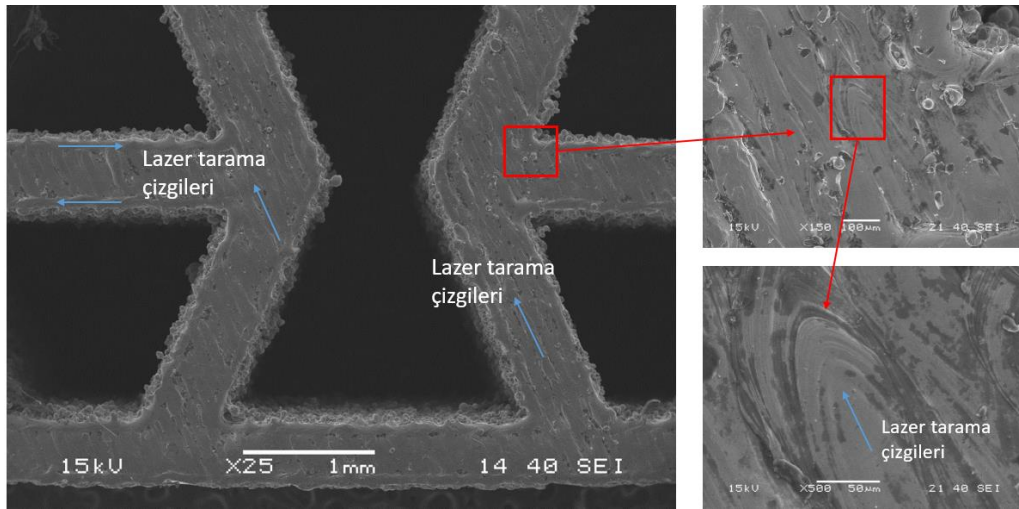
Kiriş kesitinin üst kenarlarına yakın Poisson oranının hesaplanmamasının nedeni, mandrel ve numune arasındaki sürtünme kısıtlamasının Poisson oranının doğruluğu üzerindeki etkisinden kaçınmaktır.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, öncelikle ökzetik ve ökzetik olmayan kesite sahip kiriş yapıların eğilme performansları karşılaştırmalı olarak incelenerek sonuçlar verilmiştir. Sonrasında, ökzetik kesite sahip kiriş yapıyı oluşturan sigma hücre kol açılarının değişiminin kiriş yapının yük taşıma kabiliyetine etkisi incelenmiş ve en iyi açı konumuna göre kesitte sigma hücre cidar kollarının kalınlığı fonksiyonel olarak derecelendirilerek etkisi incelenerek sonuçlar verilmiştir. Sonrasında, çalışma kapsamında özgün kiriş kesit tasarımları sunulmuş. Sunulan bu hibrit geometriler içerisinde en iyi mekanik performans gösteren kiriş yapı üretilmiş ve hem deneysel hem nümerik hem de teorik olarak hesaplanarak karşılaştırmalı olarak sonuçlar verilmiştir.

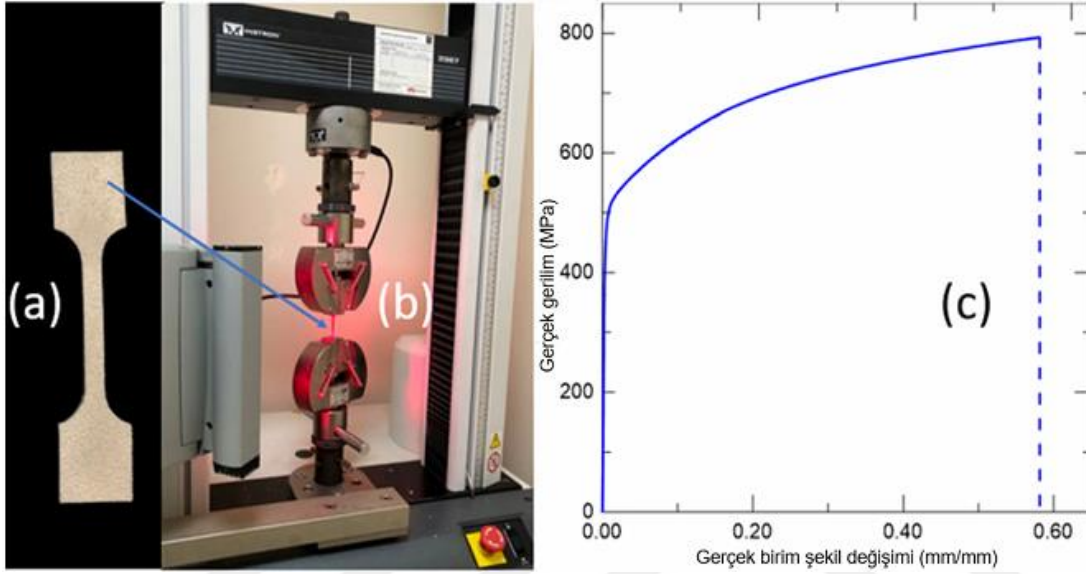
6.1. Deney Numunelerinin Üretimi ve Mekanik Özellikleri

Şekil 6.1'de verilen DMLS üretim yöntemi ile üretilen parçanın SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsünden yapının yeterince homojen olduğu ve herhangi bir süreksizlik içermediği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, DMLS yöntemiyle üretilen kiriş yapılarda üretim yönteminden kaynaklı iç kusurların, hasar oluşumunun minimize edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.1. DMLS ile işlenmiş Aux kirişin kesitinin SEM görüntüsü. Lazer tarama yönü mavi düz oklarla gösterilmiştir; numuneler yoğun, çatlaksız ve kararlı lazer eritme izlerine sahiptir.

316L matris malzemesinden üretilen çekme testi numunesinin (Şekil 6.2(a)) mekanik özellikleri üç deneysel verinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Test numunelerinin gerilme-birim şekil değişim eğrisi bir video ekstansometre ile hesaplanmıştır (Şekil 6.2(b)). 316L malzemesinden üretilen çekme numunesinin mekanik özellikleri Tablo 6.1'de elde edilmiştir. 316L malzemelerin gerçek gerilme ve gerçek plastik birim şekil değişimi eğrileri Şekil 6.2(c)'de görülmektedir.



Şekil 6.2. (a) DMLS yöntemiyle AISI 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme numuneleri, (b) Video ekstansometrenin kullanıldığı çekme deney düzeneği, (c) Elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisi.

Eşitlik (6.1) ve (6.2) kullanılarak, çekme testlerinden elde edilen mühendislik gerilme-gerinim verileri gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrilerine dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, gerçek gerilme-gerinim eğrilerinden türetilen malzeme verileri sayısal simülasyonlarda kullanılmıştır.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (6.2)$$

burada, σ_e , σ_t sırasıyla mühendislik gerilmesi ve gerçek gerilmeyi temsil eder. ε_e , ε_t sırasıyla mühendislik gerinimini ve gerçek gerinimi gösterir. Ayrıca, heterojen plastik deformasyonun gözlemlendiği bölge, kopan parçanın enine kesiti tam olarak hesaplanır

ve kırılma noktasındaki nihai gerilme ve gerçek gerilme belirlenir. Gerçek birim şekil değişimi hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\varepsilon = \ln(A_0/A_f) \quad (6.3)$$

burada, A_0 çekme numunesinin ilk kesit alanı ve A_f çekme testinden sonraki son kesit alanıdır.

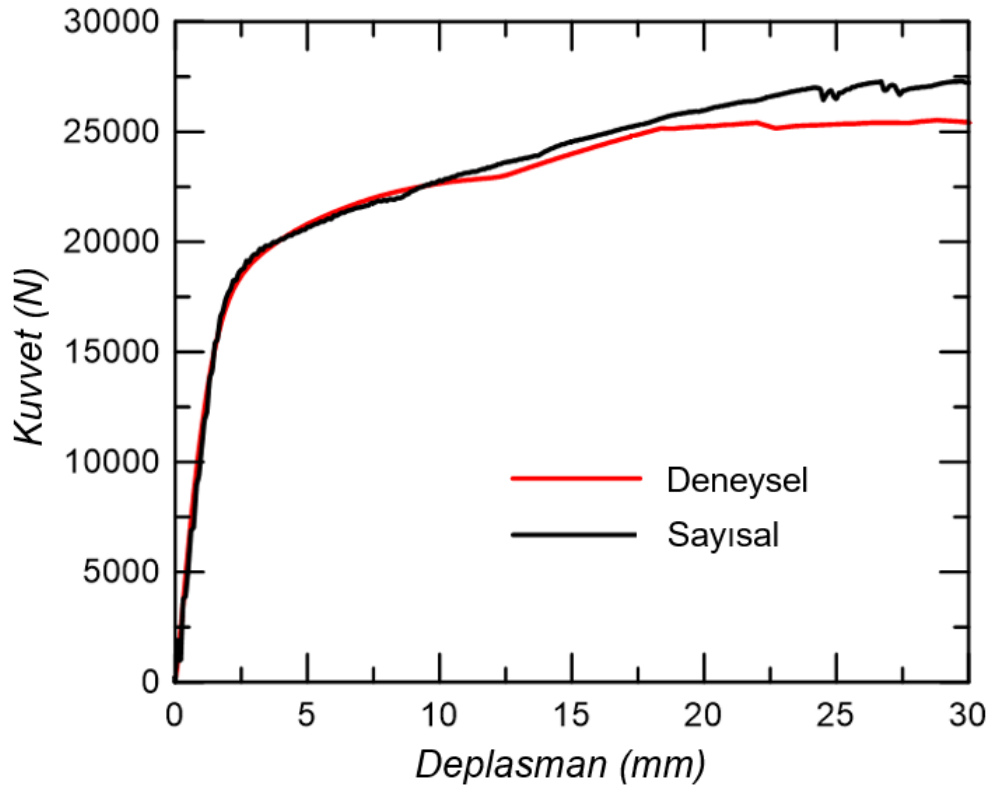
Tablo 6.1. DMLS katmanlı imalat yöntemiyle 316L paslanmaz çelikten üretilen çekme numunesinin mekanik özellikleri.

Malzeme	Elastik modülü (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Poisson oranı
316L	79643	404.8	0.32

6.2. Ökzetik Kiriş Yapının Üç Nokta Eğme Deneyi

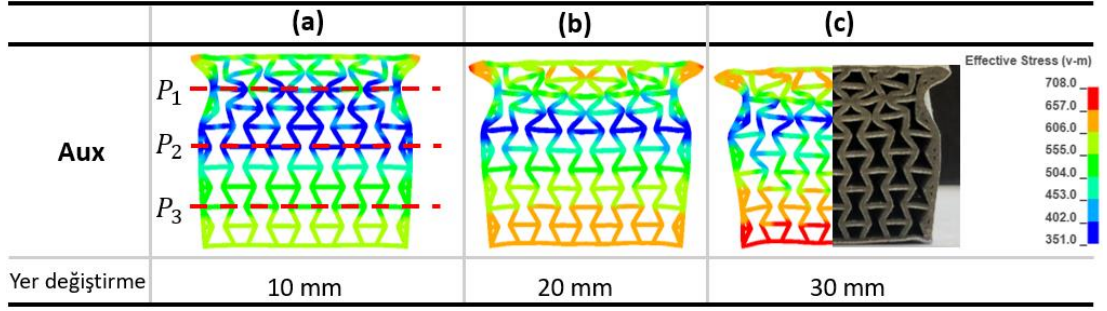
Aux kiriş yapıya ait yük-deplasman eğrisi Şekil 6.3'de gösterilmektedir. Başlangıçta, P_1 düzlemindeki ökzetik hücre kolları (Şekil 6.3) elastik burkulma gösterir ve yapının taşıdığı yük artan deplasman değeri ile tutarlı bir şekilde lineer olarak artış göstermektedir. $d > 2.5$ mm'den itibaren, P_1 düzleminde ve P_1 düzlemine komşu alt ve üst düzlemlerdeki ökzetik hücreler burkulmaya başlar ve yük-deplasman eğrisi plastik deformasyon bölgesine geçer. Daha sonra, ökzetik hücreler P_1 düzlemine yakın bölgede daha fazla basma gerilmesine maruz kalırken, P_3 düzlemi ve bu düzleme yakın bölgelerdeki hücreler çekme gerilmesine maruz kaldığı görünmektedir. Sonuç olarak, kiriş kesitindeki hücrelerde daha fazla plastik menteşe oluşur ve bu da yük-deplasman eğrisinde istikrarlı bir artışa yol açar. P_1 düzlemindeki hücrelerin ilerleyen deplasmanla beraber içe doğru yönlendiği ve bundan dolayı ökzetik hücreler merkezde toplanmasıyla, yükün uygulandığı alanın yük taşıma kapasitelerini artırır. $d = 12$ olduğunda, P_1 düzlemindeki ökzetik hücrelerin kollarının birleşim noktaları temas halindedir ($c = 0$) ve şekil değişimi bu düzlemde kısıtlanır (Şekil 6.4(a)). Bu düzlemde şekil değişiminin kısıtlanmasıyla hemen bir alt düzlemde de şekil değişimleri şiddetlenerek artmaktadır. Ökzetik hücrelerin birbirine bağlayan kollar sayesinde kesitte efektif gerilme düşük kalarak daha fazla ökzetik hücre plastik deformasyon sergiler. Bu nedenle, Şekil 6.3'de gözlemlendiği gibi, yük-deplasman

eğrisinde kuvvet artışı, yer değiştirme artışları sırasında aniden yükseliş sergilemektedir.



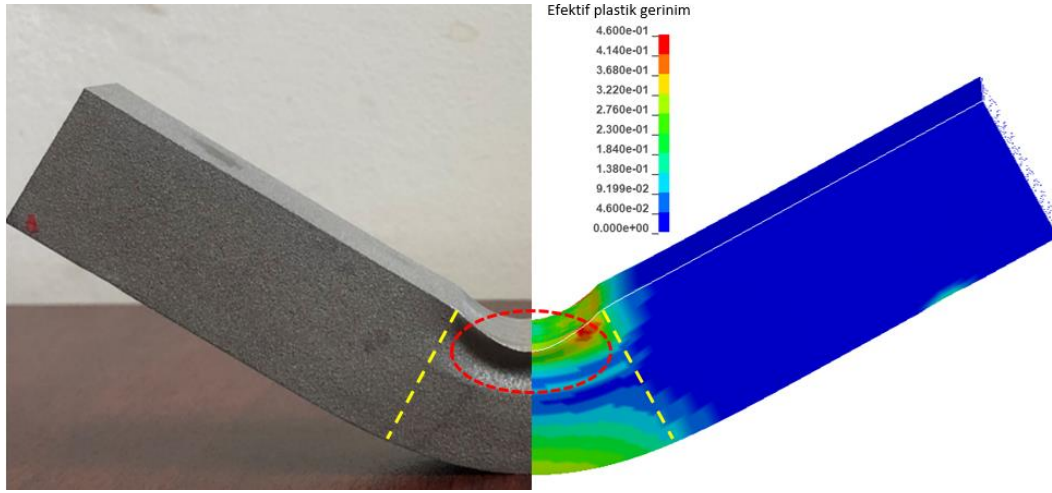
Şekil 6.3. Eğme sonuçlarının karşılaştırılması; Ökzetik tüpün deneysel ve sayısal yük-deplasman eğrileri

Daha sonra, Aux kiriş kesitinin P_1 düzlemine yakın olan üst ve alt düzlemlerde bulunan yardımcı hücrelerde, kollarının temasından sonra birbirleri üzerinde kaymaya zorlanır (Şekil 6.4(b)). Şekil 6.4(c), kesitin P_1 düzlemindeki ökzetik hücrelerin merkeze doğru hareket etme eğiliminde olduğunu ve bu yönelimin 30 mm deplasman değerinde yoğunlaştığını açıkça göstermektedir. Aux kirişin enine kesitinin kademeli bir deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır. Hücre kollarının teması ve ardından kayma hareketi, Şekil 6.3'de gösterilen kuvvet-deplasman grafiğindeki zikzakların oluşumunu açıklamaktadır.



şekil 6.4. Mandrel'in farklı deplasman değerleri altında Aux kirişin orta noktasındaki kesitte oluşan deformasyon şekli ve Von-Mises gerilme dağılımı (aynı ölçek) diyagramının gosterimi: (a) 10 mm'lik deplasman, (b) 20 mm'lik deplasman ve (c) 30 mm'lik deplasman sonucu deneysel ve sayısal analizin gosterimi.

Sonlu eleman modelinin doğruluğunu teyit etmek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Test koşullarına göre daha ileri incelemeler için doğru sonlu elemanlar modellemesi oluşturulmuştur. $d = 30$ mm olduğunda, şekil 6.4 ve 6.5'de görülebileceği gibi, deformasyon modları deneysel ve sayısal modeller arasında kiriş kesitinde ve kirişin dış cıdarında oldukça benzerdir. şekil 6.5'de görülebileceği gibi, dıştaki deformasyon sadece iki sarı noktalı çizgi aralığında grlebilir. Kiriş kesitinde ökzetik hücrelerin varlığı, dış cıdarın içe doğru yönelmesine neden olarak kirişin ana hasar mekanizması olan yerel burkulma etkisini azaltmaktadır. Bu nedenle, bu bölgede kiriş kesitindeki hücrelerin deformasyonunun derinlemesine analiz edilmesi gerekmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar başlangıçta elastik deformasyon bölgesinde mükemmel bir uyum göstermektedir. Aux kiriş yapısı için, plastik bölgedeki analiz ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama %2 civarındadır ve ilerleyen deformasyonla birlikte $d = 22.5$ mm'den sonra maksimum %6.2 değerine ulaşır. Sayısal analizin yük-deplasman eğrileri, şekil 6.3'de görüldüğü gibi deneysel testlerle uyumludur. Yük-deplasman eğrilerinin deneysel ve sayısal analizleri arasındaki fark %7'den azdır. Bu nedenle, yüksek doğruluğa sahip önerilen sayısal model daha ileri araştırmalar için uygulanabilir.



Şekil 6.5. Aux kiriş yapısının dış cidarının 30 mm deplasman sonucu oluşan deneysel ve sayısal deformasyonların karşılaştırılması.

6.2.1. Ökzetik olmayan petek yapıların deformasyonu

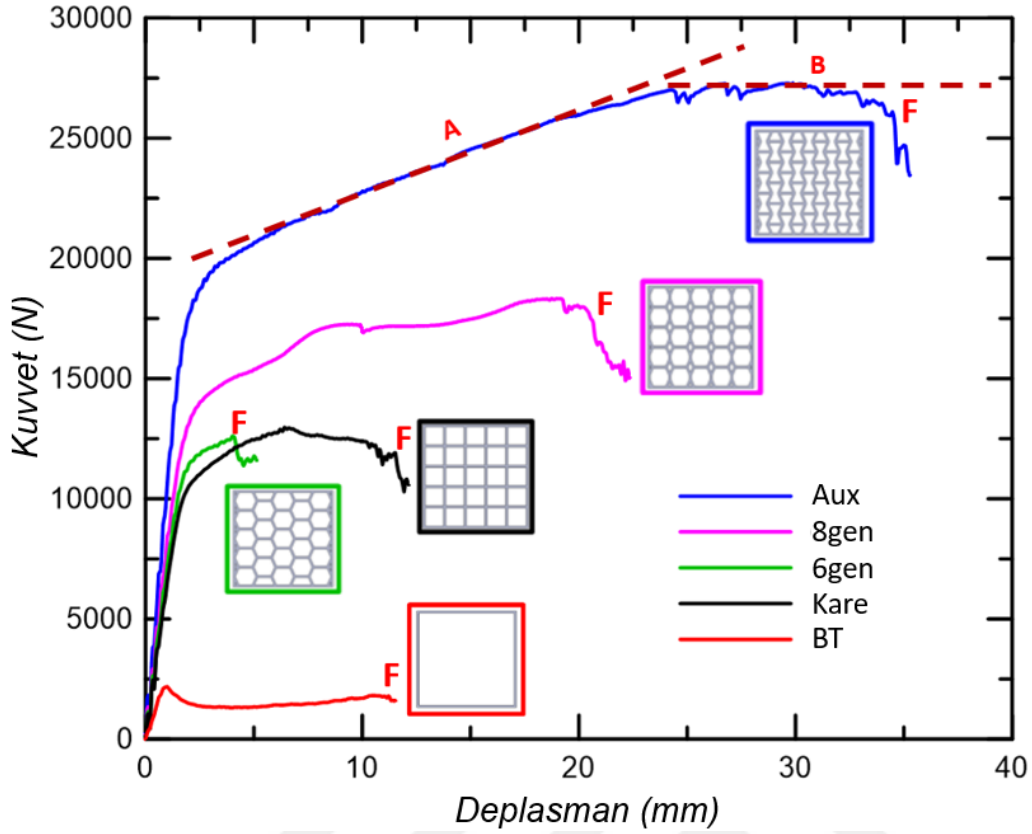
Şekil 6.6’da İçi boş kiriş (BT) yapının yanı sıra dikkate alınan 4 farklı çok hücreli kesite sahip kirişlerin kuvvet deplasman grafiği verilmiştir. BT yapının cidarda burkulmaya bağlı oldukça düşük yük taşıma kabiliyetine sahip olduğu, kırılmanın meydana geldiği “F” noktası dikkate alındığında kirişin kayda değer bir deplasmanda hasara uğradığı görülmektedir. Diğer kiriş yapılarda ise, özellikle de altıgen hücrelerle donatılmış çok hücreli kiriş için genel eğri karakterinin farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu numunede kiriş yapı düşük kuvvet (12.6 kN) değerleri yanı sıra nispeten küçük deplasmanlarda (4.8 mm) hasarlandığı dikkat çekmektedir (Şekil 6.6). Kecman [31] tarafından önerilen teorik modelde deformasyonun kiriş kesitinde farklı bölgelerinde eşit olarak dağılmadığı fark edilebilir. Özellikle, düzlem içi zorlanma durumunda hücre kollarının birleştiği mafsallarda deformasyonun daha önce başladığını belirtmiştir. Dolayısıyla, altıgen yapının düşük deplasman değerinde hasara uğraması, yükleme anında hücre cidarlarının konumları nedeniyle, burkulma oluşmaksızın kolayca eğilme eğilimine girmesiyle açıklanabilir. Hasar oluşumuna kadar bu yapının, içi boş yapı hariç diğerleriyle karşılaştırma yapılamayacak derecede yetersiz tokluk sergilediğini söylemek mümkündür.

Şekil 6.6’da, kare hücrelerle desteklenmiş kesite sahip kirişte taşınan yükün bir maksimum değere ulaştığı ve daha sonra tedrici olarak azalma eğilimine girdiği görülmektedir, altıgen yapıya göre kayda değer bir kuvvet taşıma kabiliyetine (12.9 kN) sahip olmasa da, hasarlanma belirgin bir şekilde daha yüksek deplasmanlarda

(12.5 mm) meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bu kesit için hasarlanma süreci öncelikle düşey cidarların burkulmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.4'deki grafikte sekizgen hücreler ile kesiti desteklenmiş kirişin altıgen ve kare hücrelilere göre oldukça yüksek bir eğilme performansı göstermesi (18.3 kN), hücre cidarlarının daha küçük burkulma boyuna sahip olmasının yanı sıra cidarın açılı kollar tarafından desteklenerek stabilitesinin iyileştirmiş olmasıyla açıklanabilir. Şekil 6.6'da eğrinin yaklaşık olarak 10 mm deplasmanda kısmi düşüş sergilemesi, Şekil 6.7'de gösterildiği üzere, kirişin kesitinin üst köşelerinde ve dış cidara temas eden sekizgen hücrenin düşey kollarının burkulmasıyla ilişkilidir.

Ökzetik hücreli kesite sahip kirişin yük taşıma kapasitesi ve hasar oluşum deplasmanı açısından en üstün performansı sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 6.6). Grafikten anlaşılacağı üzere, akma sonrası deplasmanla yükün kararlı bir şekilde yükseldiği (A rejimi noktalı çizgi), kabaca 27 000 N mertebesinde 31 mm deplasmana kadar bir plato bölgesi (B rejimi kırmızı çizgi) oluşturduğu ve yaklaşık olarak 35 mm'de hasarın meydana geldiği görülmektedir. Bunu numunede hasarın böylesine büyük yük ve yüksek deplasman değerinde meydana gelmiş olması Aux yapıda gerilmenin kesit içerisinde homojen ve daha düşük değerler almış olmasıyla doğrudan ilişkilidir [58, 64, 104]. Ayrıca malzemenin yüksek pekleşme oranına (çekme /akma dayanım oranı yüksek) sahip olması, yukarıda sözü edilen özelliğin daha da bariz bir şekilde grafiğe yansımaya imkan sağlamıştır. İlerleyen deplasmanlarda eğrinin zikzak hareketi göstermesi cidarların birbiri üzerinde kaymasından kaynaklandığı söylenebilir bu durum sonraki kısımda detaylandırılacaktır.



Şekil 6.6. Farklı kesitlere sahip kiriş yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.

BT'nin cidarda burkulmaya bağlı olarak, oldukça düşük yük taşıma kabiliyetine sahip olduğu, kırılmanın meydana geldiği "F" noktası dikkate alındığında, en büyük kuvvetin görüldüğü deplasmana göre, kirişin kayda değer bir deplasman sonrası hasara uğradığı görülmektedir. Diğer kiriş yapılarında ise, özellikle de altıgen hücrelerle donatılmış çok hücreli kiriş için genel eğri karakterinin farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu numune de kiriş yapı düşük kuvvet (12.6 kN) değerleri yanı sıra nispeten küçük deplasmanlarda (4.8 mm) hasarlandığı dikkat çekmektedir (Şekil 6.6). Kecman, [105] tarafından önerilen teorik modelde deformasyonun kiriş kesitinde farklı bölgelerinde eşit olarak dağılmadığı fark edilmektedir. Özellikle, düzlem içi zorlanma durumunda hücre kollarının birleştiği mafsallarda deformasyonun daha önce başladığını belirtmiştir. Dolayısıyla, altıgen yapının düşük deplasman değerinde hasara uğraması, yükleme anında hücre cidarlarının konumları nedeniyle, burkulma oluşmaksızın kolayca eğilme eğilimine girmesiyle açıklanabilir. Hasar oluşumuna kadar bu yapının, içi boş yapı hariç diğerleriyle karşılaştırma yapılamayacak derecede yetersiz tokluk sergilediğini söylemek mümkündür.

Şekil 6.6'da, kare hücrelerle desteklenmiş kesite sahip kirişte taşınan yükün bir maksimum değere ulaştığı ve daha sonra tedrici olarak azalma eğilimine girdiği görülmektedir, altıgen yapıya göre kayda değer bir kuvvet taşıma kabiliyetine (12.9 kN) sahip olmasa da, hasarlanma belirgin bir şekilde daha yüksek deplasmanlarda (12.5 mm) meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bu kesit için hasarlanma süreci öncelikle düşey cidarların burkulmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Her iki ucundan sabitlenmiş kiriş yapıların eksenel yük altındaki burkulma yükünün etkin uzunluk ile ters orantılı olduğu bilinmektedir, $L_e = 0.5L$ [29]. Sekizgen hücrenin dikey duvar uzunluğu (L) diğerlerinden daha kısa olduğundan, aynı atalet momentine sahip kare kesitli yapıdan daha yüksek bir burkulma yükü taşıyabilir. Bu nedenle, mandrelin temas ettiği bölgedeki hücre hasarını nispeten sınırlı kalmasını sağlamış ve böylece kiriş alt kesitindeki büzülme diğer yapılara kıyasla düşük kalmıştır (Şekil 6.7). Bu durum, üst ve alt köşeler hariç, kesit hücrelerinin genel olarak homojen bir şekilde deforme olmasıyla açıklanabilir. Sekiz kirişli yapıdaki düşük duvar burkulması seviyesi ve kesitin homojen gerilme dağılımı, Şekil 6.6'da verilen yük-deplasman grafiğini olumlu yönde etkilemektedir.

Ökzetik hücreli kesite sahip kirişin yük taşıma kapasitesi ve hasar oluşum deplasmanı açısından en üstün performansı sergilediği anlaşılmaktadır (Şekil 6.6). Grafikten anlaşılabileceği üzere, akma sonrası deplasmanla yükün kararlı bir şekilde yükseldiği (A rejimi noktalı çizgi), kabaca 27 000 N mertebesinde 31 mm deplasmana kadar bir plato bölgesi (B rejimi kırmızı çizgi) oluşturduğu ve yaklaşık olarak 35 mm'de hasarın meydana geldiği görülmektedir. Bunu numunede hasarın böylesine büyük yük ve yüksek deplasman değerinde meydana gelmiş olması Aux yapıda gerilmenin kesit içerisinde homojen ve daha düşük değerler almış olmasıyla doğrudan ilişkilidir [106-108]. Ayrıca malzemenin yüksek pekleşme oranına (çekme/akma dayanım oranı yüksek) sahip olması, yukarıda sözü edilen özelliğin daha da bariz bir şekilde grafiğe yansımaya imkan sağlamıştır. İlerleyen deplasmanlarda eğrinin zikzak hareketi göstermesi cidarların birbiri üzerinde kaymasından kaynaklandığı söylenebilir bu durum sonraki kısımda detaylandırılacaktır.

İncelenen kesitlerin hasarlanma süreçlerini belirlemek ve göreceli karşılaştırma yapabilmek için Şekil 6.7'de oluşturulmuş ve hasarın meydana geldiği deplasman için kesit üzerine "F" işaretlenmiştir. BT kiriş yapının üst kısmında local burkulmaya zorlandığı, deplasmanın 1.2 mm değerinde burkulma sonucu kuvvette düşüş meydana

gelmiş (Şekil 6.6) ve yaklaşık 12.5 mm deplasman sonucunda mandrelin temas ettiği üst köşelerin yırtılması sonucu yapının yük taşıma kabiliyetini tamamen kaybettiği anlaşılmaktadır. Bu yapıda taşınan yükün düşük olması nedeniyle hesaplanacak olan spesifik yük taşıma (SYT) ve spesifik enerji absorbe etme kabiliyetinin (SEA) sınırlı kalacağı açıktır (SYT=42.67 N/gr, SEA=0.34 J/gr).

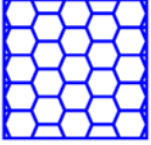
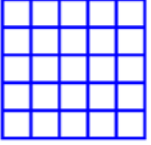
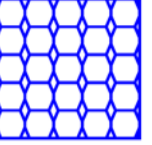
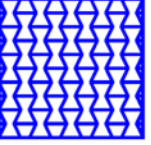
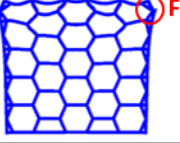
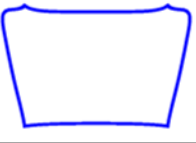
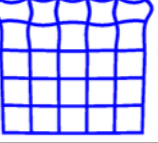
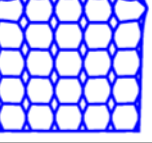
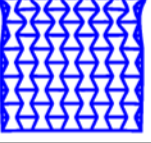
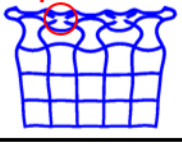
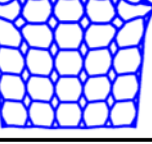
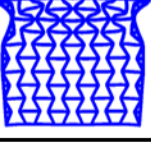
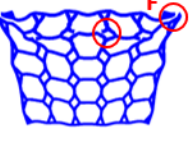
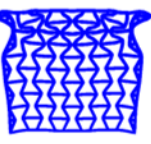
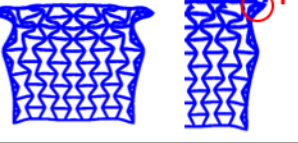
Altıgen hücreli kirişte hücre cidarlarının açılı konumlanması, cidarı daha kolay eğilmesine yol açmış ve bunun sonucunda mandrel'in temasıyla kesitin üst yüzeyine yakın hücrelerin nispeten daha düşük yüklerde hasara uğramış ve yanal doğrultuda deformasyona neden olmuştur. Oldukça düşük bir deplasmanda (4.8 mm) üst sağ ve sol köşelerdeki hücrelerin mafsalları aşırı deformasyon sonucu kırılmıştır. Bu yapı en düşük hasar deplasmanına (4.8 mm) sahiptir. Bu yapı Şekil 6.11'de gösterildiği üzere SYT ve SEA değerleri itibarıyla sadece BT yapıya göre üstün olduğu söylenebilir (SLC= 0.31 N/gr, SEA= 78.03 J/gr).

Şekil 6.7'de kare hücreli yapının kesit deformasyonu incelendiğinde, kuvvetin etkisinde öncelikli olarak üst yüzeye yakın hücrelere ait düşey doğrultudaki cidarların burkulduğu ve ilerleyen deformasyonla bir alt hücrelerin yatay cidarlarının da burkulmasıyla katıldığı görülmektedir. Bu nedenden dolayı üst yüzeye bölgenin dışarıya, bir alt hücrelerin ise kesitin içeriye doğru daralma eğilimine girdiği dikkat çekmektedir. Bu grup kesitte altıgen hücreli kesite göre katlanma şeklindeki deformasyonun oluşmaması hasarlanma deplasmanında önemli oranda artmasına (12.5mm) sağlamıştır. Bu durum Şekil 6.6'daki yük deplasman grafinde eğrinin maksimum değerine ulaşması sonrasında kesitin üst bölgesinde düşey kollarda burkulmanın gerçekleşmesiyle yapının taşıdığı yükün tedrici olarak azalmasına yol açmıştır.

Bilindiği üzere burkulma tehditi altındaki her iki ucu sabitlenmiş narin yapıların eksenel yük altında burkulma yükü efektif uzunluk, $Le = 0.5L$ ile ters orantılıdır [109]. Sekizgen hücrede düşey cidar boyunun (L) diğerlerinden daha kısa olması nedeniyle, aynı atalet momentine sahip kare kesitli yapıya göre daha yüksek burkulma yükü taşıyabilmektedir. Dolayısıyla mandrel'in temas ettiği bölgede hücre yıkımının nispeten sınırlı kalmasını ve bu sayede kiriş alt kesitindeki daralmanın diğer yapılara göre daha düşük seviyede kalmasını sağlamıştır (Şekil 6.7). Bu durum kesiti oluşturan hücrelerin üst ve alt köşelerdekiler hariç genel olarak homojen deformasyona uğramasıyla açıklanabilir. Sekizgen hücreli yapıda cidar burkulmasının düşük

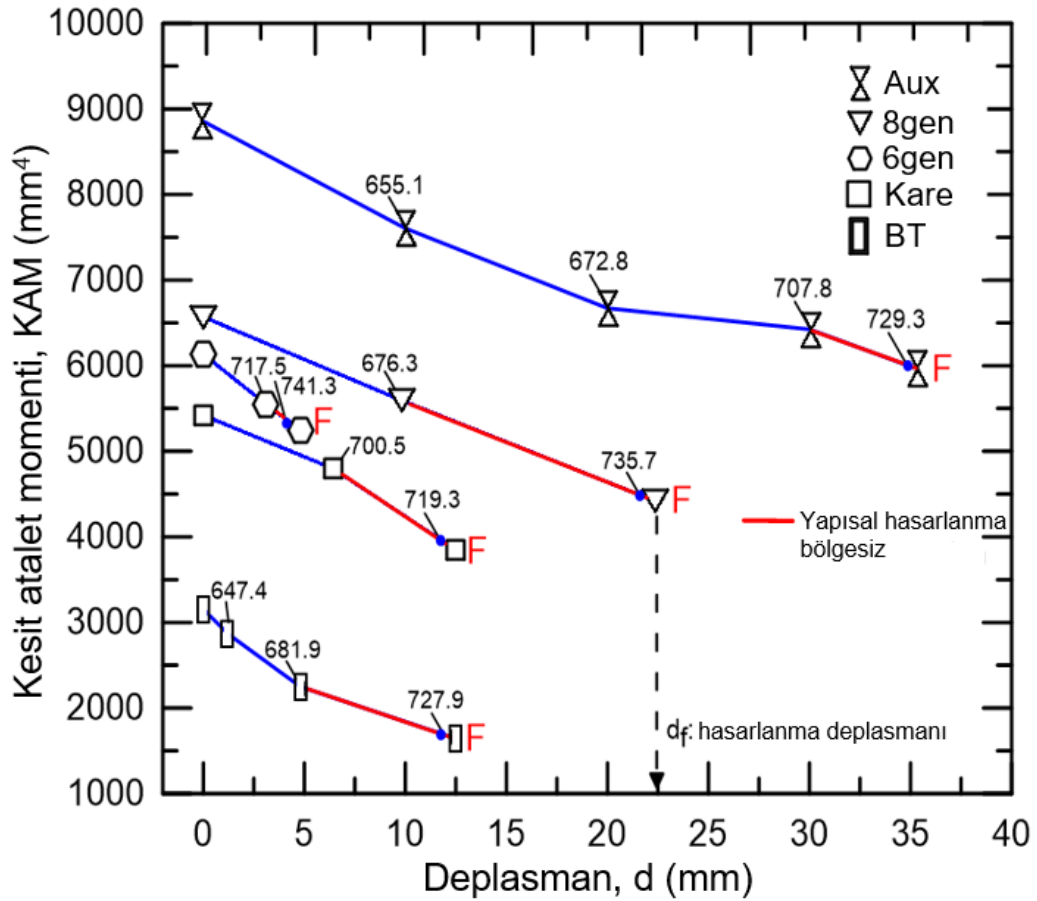
seviyede kalması ve kesitin homojen zorlanması Şekil 6.6'da verilen yük-deplasman grafiğine olumlu yönde yansımıştır. Şekil 6.7'de görüleceği üzere, hasarlanma 22.5 mm deplasman değerinde, kesitin üst kısmında sağ ve sol köşedeki hücre cidarlarında meydana gelmiştir. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere sekizgen kesitli kiriş yapıda sadece yük taşıma kabiliyeti iyileşmemiş, ayrıca nispeten yüksek deplasman değerinde deformasyonu sonucunda absorbe ettiği enerji değeri de artmıştır (SYT=102.3 N/gr, SEA= 1.98 J/gr).

Şekil 6.7'de, en yüksek hasarlanma deplasmanına sahip olan ökzetik hücreli kiriş yapısının dış cidardaki burkulma etkisiyle, sekizgen yapılı kesitin (ve diğerlerinin) aksine (negatif Poisson oranı nedeniyle) cidarların içeriye yönlenmesini ve ayrıca kesit genelinde yüzeye yakın hücrelerden merkeze doğru, hücre cidarların azalan şiddette parça merkezine yönelmiş olması hücrelerin yük taşımaya ortak edildiğini işaret etmektedir. Kesitte daralmanın sadece üst kısma yakın bölgede meydana geldiği, diğer kesitlerin davranışından farklı olarak ayrıca dışarıya yönlenmenin oluşmadığı dikkat çekmektedir. Bu bir anlamda yapının bütünlüğünü koruyarak daha yoğun bir kesit hali alması şeklinde de yorumlanabilir. Böylece kesitin daha fazla yük taşıması ve cidarda deformasyonun yoğunlaşmaması nedeniyle de kırılmanın daha ileri deplasmanlara (35.4 mm) ötelenmesine sağlanmıştır. Bu grup kirişte hasar (kırılma) mandrel'in temas ettiği alt yüzeye yakın köşe yırtılması sonucu meydana gelmektedir.

Yapılar Deplasman	6gen	BT	Kare	8gen	Aux
0 mm					
4.8 mm					
12.5 mm					
22.5 mm					
35.4 mm					

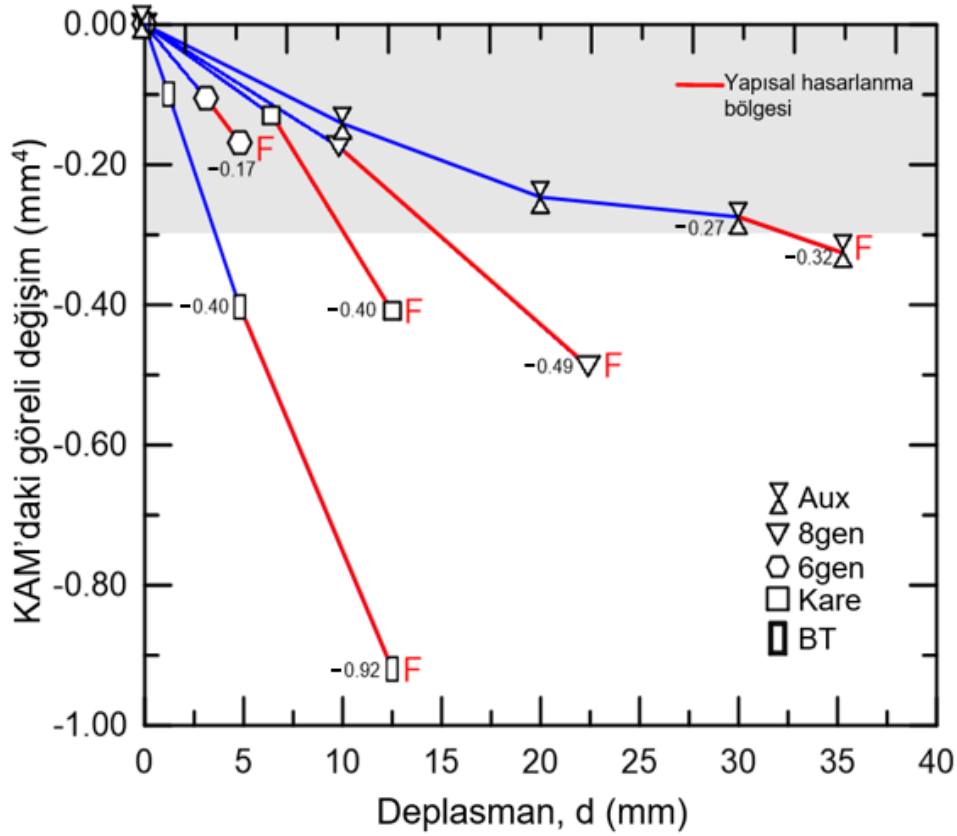
Şekil 6.7. Kiriş kesitinde oluşan şekil değişimleri ve hasarın görüldüğü deplasmanların değişimi.

Şekil 6.6’da ökzetik hücreli kiriş yapının kuvvet-deplasman eğrisinin plastik bölgede parça hasarlana dek azalan hızda yükselmiş olması ve genel olarak en iyi performansı göstermiş olması, kesitin sahip olduğu negatif Poisson oranıyla ilişkilidir. Bu sayede, kesit homojen ve daha düşük gerilmelere maruz kalmakta, ayrıca ilerleyen deplasmanlarda kesit atalet momenti daha az kayba uğramaktadır. Şekil 6.8’de incelenen yapıların hasarlanmaya kadar olan süreçte kesit atalet momentlerindeki (KAM) değişim ve bazı deplasman için kesitteki maksimum efektif gerilme değerleri (Von-Mises) MPa cinsinden verilmiştir. Eğride kırmızı renkli kısım kuvvet-deplasman grafiğinde yapısal çökme kısmını (maksimum değerinden sonraki) belirtmekte ve hasarın oluştuğu deplasman “F” ile gösterilmiştir (Şekil 6.8). Grafiğin genelinden, artan deplasmanla tüm kesitlerin KAM değerlerin azaldığı, efektif gerilmenin ise beklendiği gibi, artma eğilimine girdiği görülmektedir.

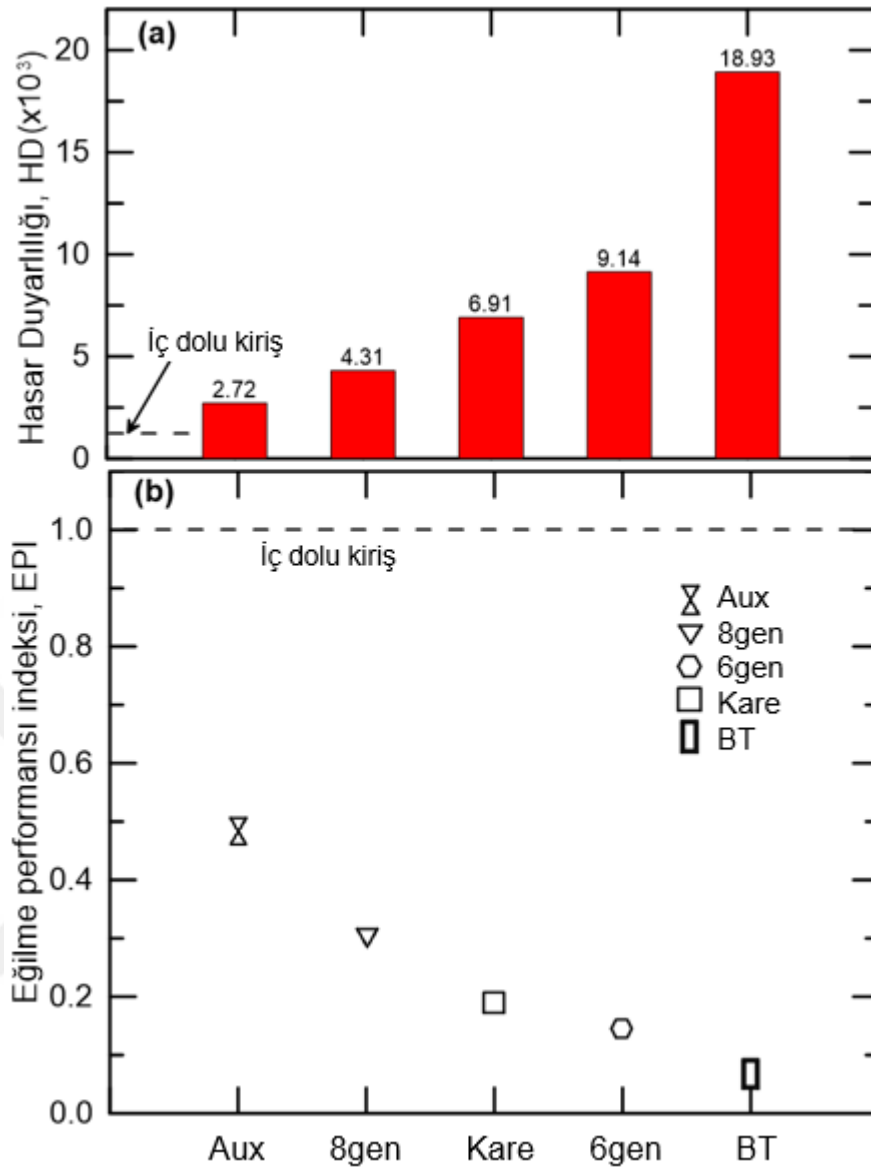


Şekil 6.8. Kesit atalet momentinin mandrelin deplasman değişimi ile ilişkisi. Grafikte mavi noktalar için belirtilen rakamlar, kırılma öncesi deplasman için Von Mises gerilimini vermektedir.

Şekil 6.9’da söz konusu kesitlerin deplasmana bağlı olarak KAM’daki bağıl değişimi vermektedir. Aux yapıda yük taşıma performansının KAM’da bağıl değişim değerinin 0.32 kadar devam ettiği dikkat çekmektedir. BT kesit için bu değer daha küçük deplasman aralığında (12.5 mm) %92’dir. Ökzetik hücreli kesitin, altıgen hücreli hariç, bu yapıların içerisinde en büyük deplasmana rağmen, KAM’daki en düşük bağıl değişim gösteren kesit iken, altıgen hücreli yapının hem KAM’daki en düşük bağıl değişimi hem de en düşük deplasman değerinde hasarlanmış olması ilginçtir. Bu davranış yukarıda sözü edildiği gibi, eğik konumdaki cidarların kolayca katlanarak mafsallı oluşumu sonrası hızlı bir şekilde hasar oluşumunu başlatmış olmasıyla ilgilidir.



Şekil 6.9. Mandrel'in deplasman ile KAM'daki bağıl değişim.



Şekil 6.10. Çok hücreli kesite sahip kiriş yapılarda, hasar duyarlılığı ve eğilme performans indeksinin hücre geometrisiyle değişimi.

Şekil 6.10’da gösterildiği üzere yapıların kaybettikleri kesit atalet momenti değişimleri yapıların hasarlanmasına kadar geçen deplasmana göre karşılaştırılması yapılmıştır. İncelenen farklı hücre kesitlerinin performansının değerlendirilmesinde kiriş hacmi ve hasarın olduğu deplasmanın KAM’daki değişimle birlikte dikkate alınması faydalı olacaktır. Aşağıdaki eşitlik (6.4)’de, ΔKAM kesit atalet momentindeki değişim miktarı (mm^4), V kiriş hacmi (mm^3) ve d_f (mm) hasarlanma deplasmanı olarak tanımlanır, dolayısıyla hasar duyarlılığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$HD = \frac{\Delta KAM (mm^4)}{V (mm^3) \cdot d_f (mm)} \quad (6.4)$$

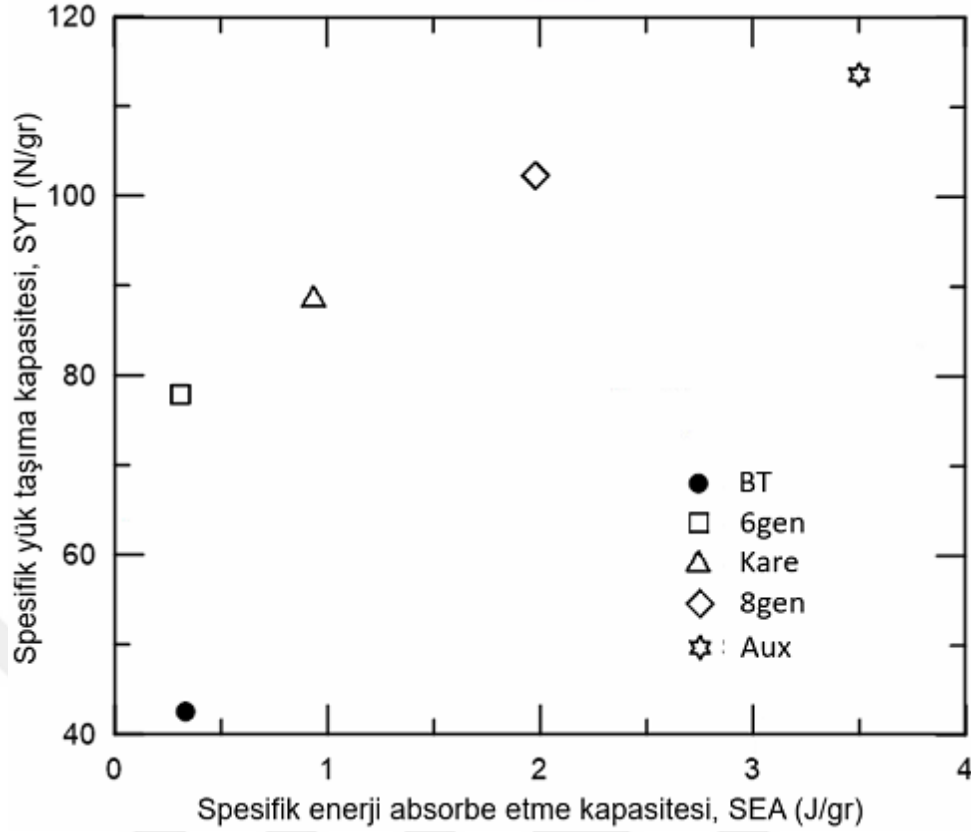
V yapının hacmi ve d_f ise yapının hasara uğradığı deplasman değeridir.

Boyutsuz bir parametre olarak tanımlanabilir. BT ve çok hücreli kiriş yapıların, dolu kiriş yapıya göre yük taşıma kabiliyetini ifade etmek için bir başka yaklaşım olarak, çok hücreli kesitin hasarlanma duyarlılığının dolu kiriş yapınıninkine oranı olan eğilme performans indeksi (EPI) tanımlanabilir;

$$EPI = \frac{HD_{hüc}}{HD_{dolu}} \quad (6.5)$$

BT kiriş yapıda hasarlanma duyarlılığının yüksek olmasının nedeni, düşük deplasmanla beraber kirişin üst köşelerinde burkulma oluşmasıyla bu noktalarda gerilme yığılması sonucunda parça hasara uğramaktadır. Fakat, Aux kiriş yapıda hem NPO hücrelerin varlığı hem de bu hücrelerin birbiriyle etkileşiminden dolayı gerilme kesitte nispeten homojen şekilde dağıldığı söylenebilir.

Şekil 6.10(a) bu kesitlerin HD oranlarını göstermektedir. Hasar duyarlılığı, yani kesitin hasara olan yatkınlığı, beklendiği gibi BT yapı için en yüksek ve içi dolu kesit için en düşüktür. Aux kirişinin mevcut çok hücreli kesitler arasında en iyisi olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.10(b)'de kesitlerin EPI değişimi analiz edilmiş olup, ökzetik hücrelere sahip Auxkirişin EPI değerinin içi dolu kesitten sonra en iyi olduğu görülmektedir.

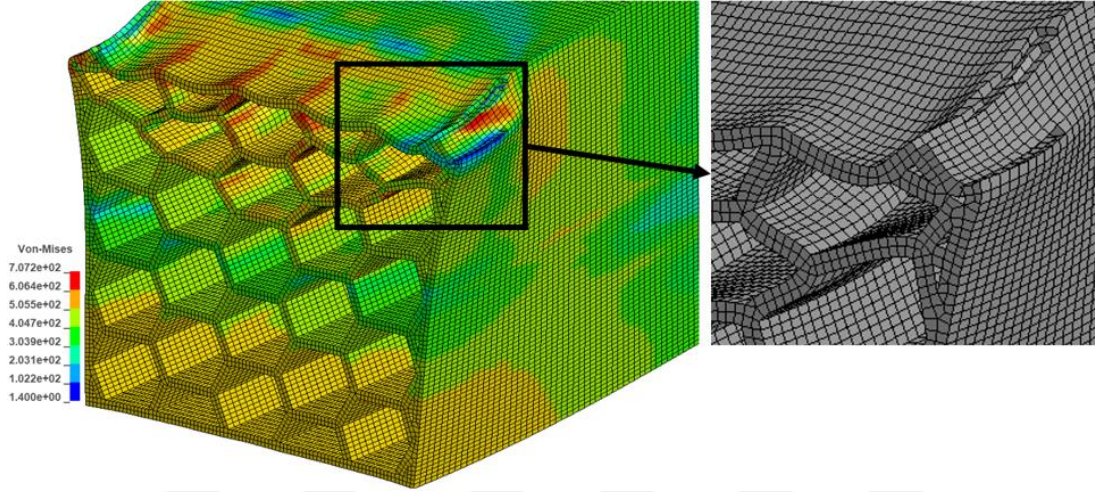


Şekil 6.11. Kesit boyutu ve hücre yüksekliği sabit kiriş yapılar için özgül yük taşıma kapasitesinin, özgül enerji absorbe etme kapasitesiyle değişimi.

Şekil 6.11’de aynı geometrik parametrelere ve hücre sayısına sahip kiriş yapıların SYT ve SEA kabiliyetleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Buna göre petek yapılarla donatılmış kiriş yapıların içi boş tüp yapılara göre eğilme direnci daha fazla olduğu görülmektedir. Bu hücreli kiriş yapılarla ilişkin Bilston ve ark. [110] ve Z. Huang, ve ark. [111] yaptıkları çalışmalara benzer bulgularla tutarlı olduğu görülmektedir. Aux yapı sahip olduğu NPO kesit sayesinde gösterdiği muazzam yük taşıma kabiliyeti ve enerji absorbe yeteneğinden dolayı Kare ve 8gene göre sırasıyla SEA’de 3.77 ve 1.77 kat daha fazla performans gösterdiği bulunmuştur. Yapısal elemanların tasarımı, kütleyi en aza indirirken mekanik dayanıklılık gereksinimlerini de dikkate almalıdır. Dolayısıyla, Aux kiriş yapıda enerji kontrollü bir şekilde absorbesi gerçekleşirken taşınan kuvvet burkulma veya yıkıcı hasar gibi dengesiz davranışlara neden olması önlenmektedir.

Şekil 6.12’de Mandrel’in 6gen kiriş yapısındaki altıgen hücelere temas ettiği bölümde, altıgen hücrelerin düzlem içi gerilmesinden dolayı eğimli hücre cidarlarının birleştiği mafsallarda gerilme yığılması nedeniyle kırılma bu bölgeden başlamakta ve

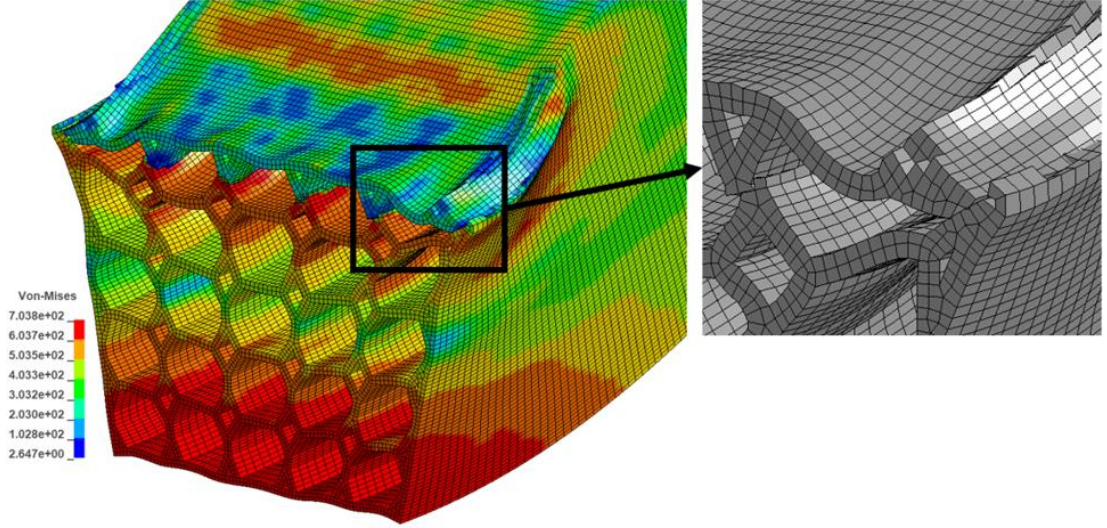
altıgen hücrelerin mafsalları ile dış cidarın birleştiği noktada kotastropik kırılma meydana gelmektedir (Şekil 6.7). Dolayısıyla kirişin taşıdığı yükün aniden keskin bir düşüş trendine girdiği söylenebilir.



Şekil 6.12. 6gen'in sonlu elemanlar analizi sonucunda deplasmana bağlı kesitte oluşan deformasyon ve kırılma.

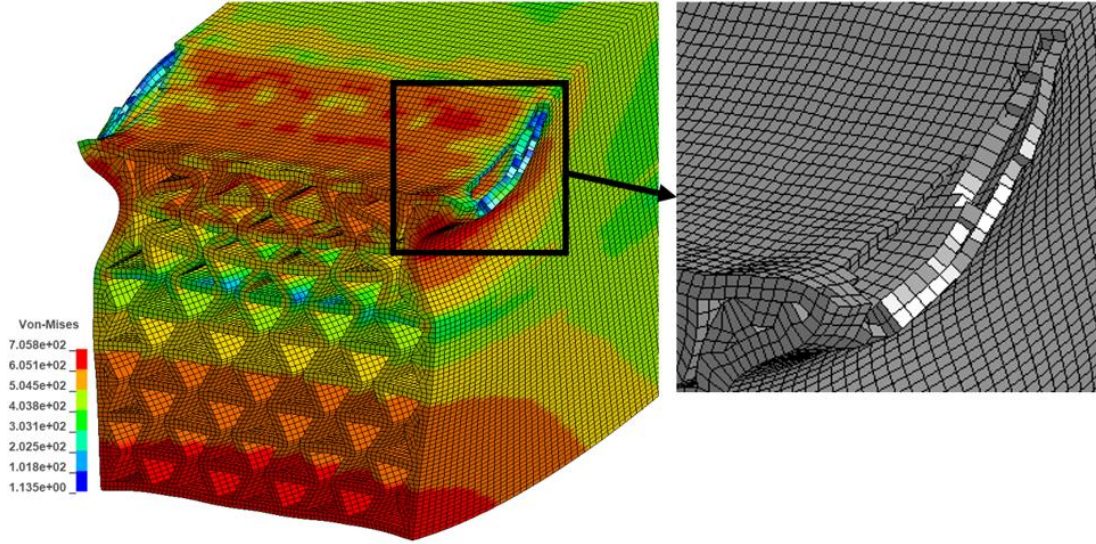
Şekil 6.7'de görülebileceği gibi, kare kiriş yapısının hasar mekanizması başlangıçta, mandrelin temas ettiği bölgenin altında kalan kesitin üst bölgesindeki kare hücrelerin dikey kollarının burkulmasından kaynaklandığı söylenebilir.

8gen kiriş yapısında, sekizgen hücreler düzlem içi basma gerilmesi altında daha kararlı davranmış ve uzun bir deplasman boyunca nispeten yüksek yük taşıma kuvvetini korumuştur. Ancak 22.5 mm deplasman sonucunda kesitin üst bölgesindeki sekizgen hücrelerin düşey kollarında aşırı deformasyona bağlı burkulma nedeniyle hasar meydana geldiği söylenebilir. Şekil 6.13'de görüleceği üzere, artan deplasmanla birlikte kesitin üst köşelerinde yer alan sekizgen hücrelerin düşey kollarındaki burkulma şiddetlenmekte ve bu noktada hasar meydana gelerek yapının yük taşıma kabiliyetinde ani bir düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 6.13. 8gen'in sonlu elemanlar analizi sonucunda deplasmana bağlı kesitte oluşan deformasyon ve kırılma.

En iyi spesifik enerji absorbe etme kabiliyetine sahip kiriş kesiti 3.5 J/gr ile Aux yapısına aittir. Mandrel'in altındaki üst köşede gerilme yığılmasına bağlı köşe yırtılmasını önlenmekte, böylece daha yüksek deplasman değerlerinde bile yük taşıma kabiliyeti korunmaktadır. Şekil 6.14'de görüldüğü üzere, sonraki deplasmanda, Şekil 6.8'de görüldüğü gibi yüksek kesit atalet momenti korunmasına rağmen, kirişin üst yüzeyinde mandrelin hareketinden dolayı çatlak meydana gelmekte ve bu bölgede aşırı deformasyon ile cidarın üst köşelerinde yırtılma hasarı oluşmaktadır. Sonuç olarak, hasarın kirişin orta kesitinde olmadığı, ancak üst cidarın eğilme nedeniyle burkulması sonucu yapının hasar gördüğü söylenebilir. Benzer hasar mekanizması BT kiriş yapısında da çok erken deplasmanlarda gözlenmiştir. BT kiriş yapısında, yaklaşık 12.5 mm'lik bir deplasmanda, yük-deplasman eğrisinde ani bir düşüş meydana gelmiştir. Bu deplasman değerlerinde, üst köşeler boyunca aksel bir yırtılma meydana gelir ve bu da kirişin dikey kollarının mandrelin deplasmanı ile yanal olarak genişlemesine yol açar.



Şekil 6.14. Aux'un sonlu elemanlar analizi sonucunda kesitte oluşan deformasyon ve hasar bölgesinin detayı.

6.3. Ökzetik Hücre Kol Açısının ve Hücre Cidar Kalınlığının Değişiminin Eğilme Davranışı Üzerindeki Etkisi

Negatif Poisson oranının (NPO) ayarlanabilirliği sayesinde benzersiz mekanik özellikler sergileyen Ökzetik (Aux) yapılar son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu bölümde, ökzetik hücrelerin kiriş eksenine boyunca yönlendirildiği kiriş yapısının eğilme altındaki eğilme tepkisi ve enerji absorbe etme davranışı, farklı kol açıları (55-85 derece) ve kesitte fonksiyonel derecelendirilmiş hücre cidar kalınlıkları için deneysel ve sayısal olarak sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bir önceki bölümde tartışması yapılan ökzetik çok hücreli kesite sahip kiriş yapının, hücre kol açısının değişiminin yapının üç nokta eğme altındaki davranışını incelenecektir. Sonrasında en performansı sergileyen kol açısı için kiriş kesitinde ökzetik hücre kollarının tarafsız ekseninden dış cidara doğru fonksiyonel kademeli olarak kalınlığının değiştirilmesiyle eğilme performansı değerlendirilecektir.

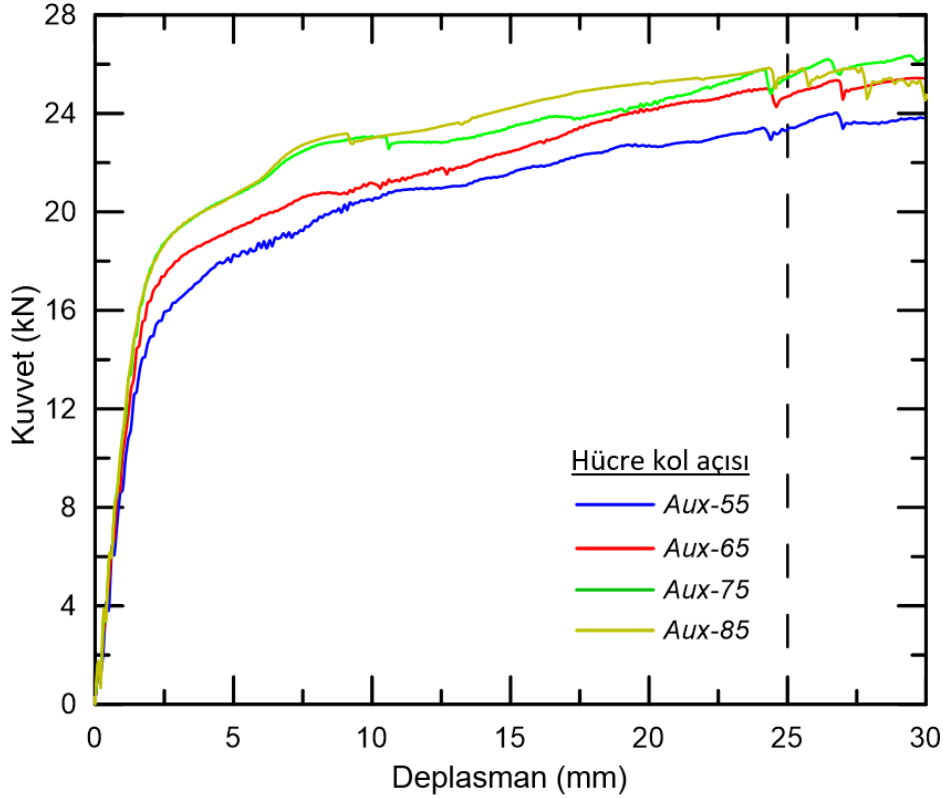
Bu bağlamda, bölüm 6.2'de kesiti ökzetik hücrelerden oluşan kiriş yapının farklı hücre açıları ve kesitte hücre cidarları fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tasarımından bahsedilmiştir. Sonrasında, önceki sonlu elemanlar analizine dayanarak, ökzetik hücre kol açısının değiştirilmesinin kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme kapasitesi üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Daha sonrasında ise hücre cidar kalınlığının Aux-75 kiriş yapısının eğilme davranışı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Eğilme yükü altında, tarafsız eksenin üstündeki bölgenin basınç gerilmesine maruz kaldığı, tarafsız eksenin altındaki bölgenin ise çekme gerilmesine maruz kaldığı bilinmektedir. Gerilme tarafsız

eksenden cidara doğru armakta ve dolayısıyla maksimum gerilme en dış cidarda oluşmaktadır. Tasarımda bu faktör göze alınarak kiriş kesitini oluşturan ökzetik hücreler tarafsız eksenden dış cidara doğru farklı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalınlık etkisi eğilme direnci üzerine etkisinin sonuçları sunulmuştur.

6.3.1. Hücre kol açısının etkisi

Bölüm 6.2’de deneysel olarak üç nokta eğme direnci incelenen kiriş yapının sonlu elemanlar modellemesi ile karşılaştırılması yapılarak sonlu elemanlar modelinin doğruluğu teyit edilmiştir. Bu bölümde sonlu elemanlar modeliliyle ökzetik hücre kollarının açısının değişimini kiriş yapının eğilme davranışı üzerine etkileri sonlu elemanlar çalışmasıyla gerçekleştirilecektir.

Bu bölümde, bir önceki sonlu elemanlar methodunu analizine dayanarak, ökzetik hücre kol açısının değiştirilmesinin kirişin yük taşıma kabiliyeti ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.2’de tanımlanan kol açısı (θ) için 55, 65, 75 ve 85 derecelik modeller oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Aux kesitinin dış cidar boyutları ve kesitteki hücre sayısı ile aynı bağl yoğunluğa ($\bar{\rho} = 0.485$) sahiptir. Şekil 6.15’de, farklı hücre kol açılarna sahip Aux kiriş yapıların yük-deplasman eğrilerini göstermektedir. Hücre kol açısı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Farklı hücre kol açılarna (55, 65, 75 ve 85) sahip kirişler genel olarak yük-deplasman eğrilerinde benzer eğilimlere sahiptir.

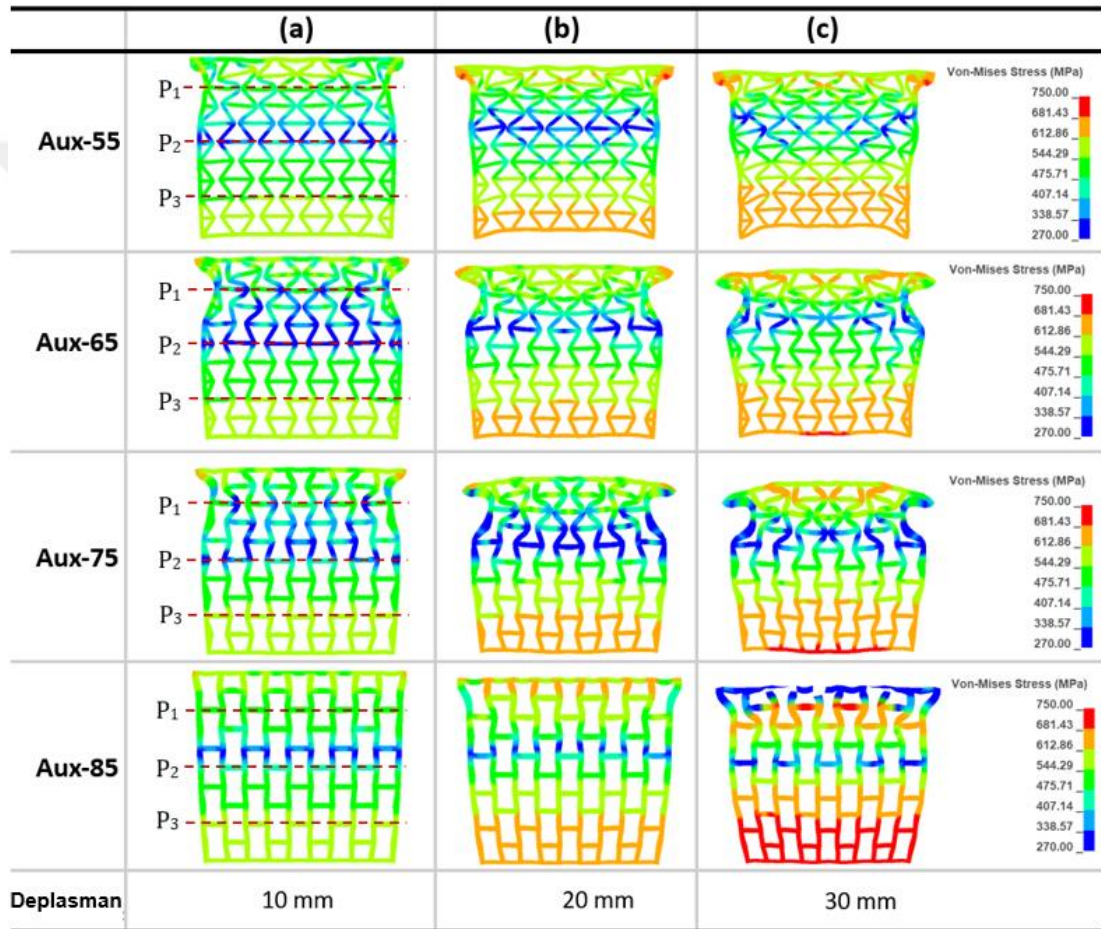


Şekil 6.15. Aynı bağıl yoğunluk sahip kirişler için hücre kolu açısının yük-deplasman eğrisi üzerindeki etkisi.

Hücre kolu açısının artırılmasıyla, sabit bağıl yoğunluğu sahip kirişlerde hücre cidarı kalınlığında da bir artışa yol açtığından, Aux kirişinin yük taşıma ve enerji emme kapasitelerinde iyileşme ile sonuçlanır. Bunun nedeni, hücre kolu açısındaki bir artışın ökzetik hücre kollarının dikey olma eğilimini artırmasıdır, bu da sadece plastik mafsalları oluşumunu daha zor hale getirmekle kalmaz, aynı zamanda kesitin atalet momentini de artırır. Bu da kiriş yapısının eğilme direncini artırır. 85 derece açılı numune hariç, 25 mm deplasman civarında tüm kiriş yapılarında ökzetik hücre kolları temas sonrasında bu hücre kollarının birbirleri üzerinde kayması nedeniyle eğride bir zig-zag davranış meydana gelir. 85 derece açılı yapıda, yapının üst yüzeyinin cidarında aşırı deformasyon nedeniyle hasar başlayarak eğride daha sık ve daha büyük dalgalanmalara neden olur ve eğri 27.5 mm deplasmandan sonra azalma eğilimi gösterir. Bu nedenle, kiriş yapıların analizinde sadece 25 mm'lik deplasmana kadar olan kısmı kıyaslama için dikkate alınmıştır.

Deformasyon detayları Şekil 6.16'da gösterilmektedir. Hücre kolu açısının değiştirilmesi ökzetik kesitin deformasyon modunu değiştirmedeği görülmektedir. Öte yandan, hücre kolu açısının en dar olduğu durumda (55 derece), ökzetik hücreler

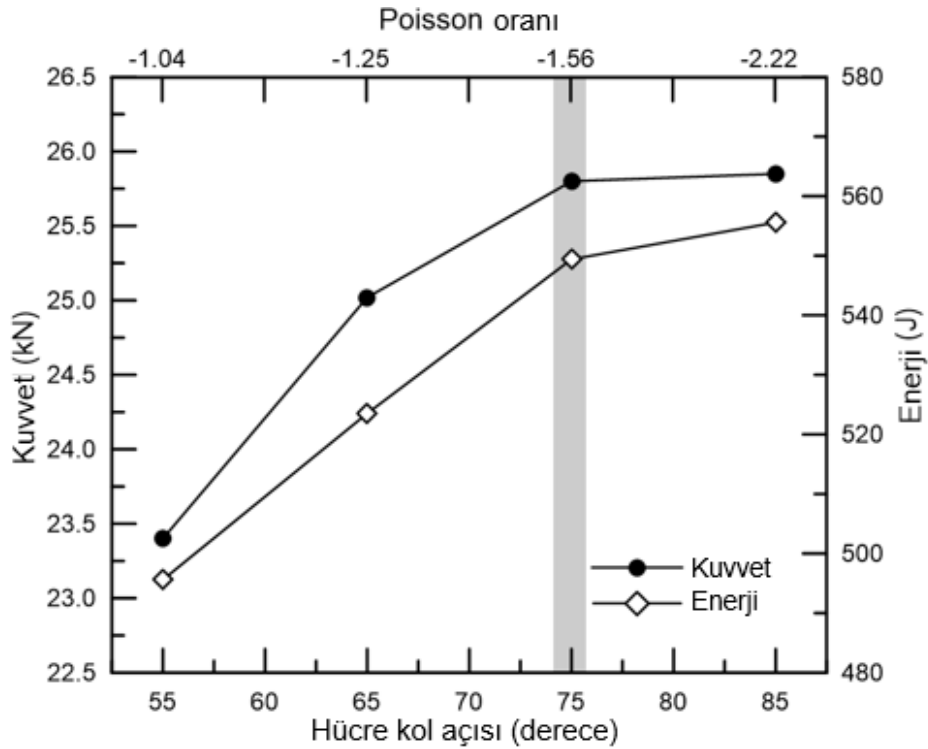
tüm düzlemlerde (P_1 , P_2 ve P_3) açıkça merkeze doğru yönelmektedir. Bunun nedeni, hücre kol açısının azalmasının kirişin enine kesitinde azalan bir NPO'ye yol açması ve bunun da hücre deformasyonunu kısıtlamasıdır. Bu nedenle, küçük deplasman değerlerinde özetik hücrenin deformasyonu kısıtlanarak, deformasyon diğer düzlemlere taşınır ve böylece tüm kesitte deformasyon gözlenir. Eğimli hücre kollarının birbiri üzerinde kayma imkanı bulamadığından dolayı, Şekil 6.16(a)'da görüldüğü gibi Aux-55'in yük-deplasman eğrisinde yük doğrusal olarak arttığı gözlemlenmektedir.



Şekil 6.16. Farklı hücre kol açılarına sahip Aux kiriş kesitlerinde oluşan deformasyon ve Von-Mises gerilme dağılım gösterimi: (a) 10 mm'lik deplasman, (b) 20 mm'lik deplasman ve (c) 30 mm'lik deplasman.

Aux-85 kiriş yapının daha yüksek cidar kalınlığı nedeniyle (sabit yoğunluk gereksinimi nedeniyle), diğer numunelere göre nispeten daha rijit davranmaktadır (Şekil 6.16). Bu da kesitin üst yarısındaki deformasyonu sınırlamıştır. P_1 düzlemindeki eğimli hücre kollarının burkulma direnci, kesitin atalet momentinde daha az kayba ve dolayısıyla 10-20 mm deplasman aralığında nispeten daha yüksek yük taşıma

kapasitesine yol açmıştır (Şekil 6.15). Ancak mandrelin 20 mm deplasman sonucunda (Şekil 6.16(b)), tüm kesitin ve özellikle üst ve alt yüzeylere yakın dikey kollarında daha yüksek gerilmelere maruz kaldığı dikkat çekmektedir. İlerleyen deplasmanla birlikte, cidarlardaki aşırı gerilme hasara yol açar ve 30 mm deplasmanda, çoklu hasarın meydana gelmesi, üst yüzeye yakın cidarlardaki gerilmelerde bir azalmaya neden olmuştur. Bu numunede, daha kalın cidara ek olarak, hücre kol açısının yüksek olması nedeniyle hücre kolunun nispeten daha düşük eğimi, kesitteki ökzetik davranışı sınırlandırmış ve erken hasar oluşumuna yol açtığı söylenebilir.



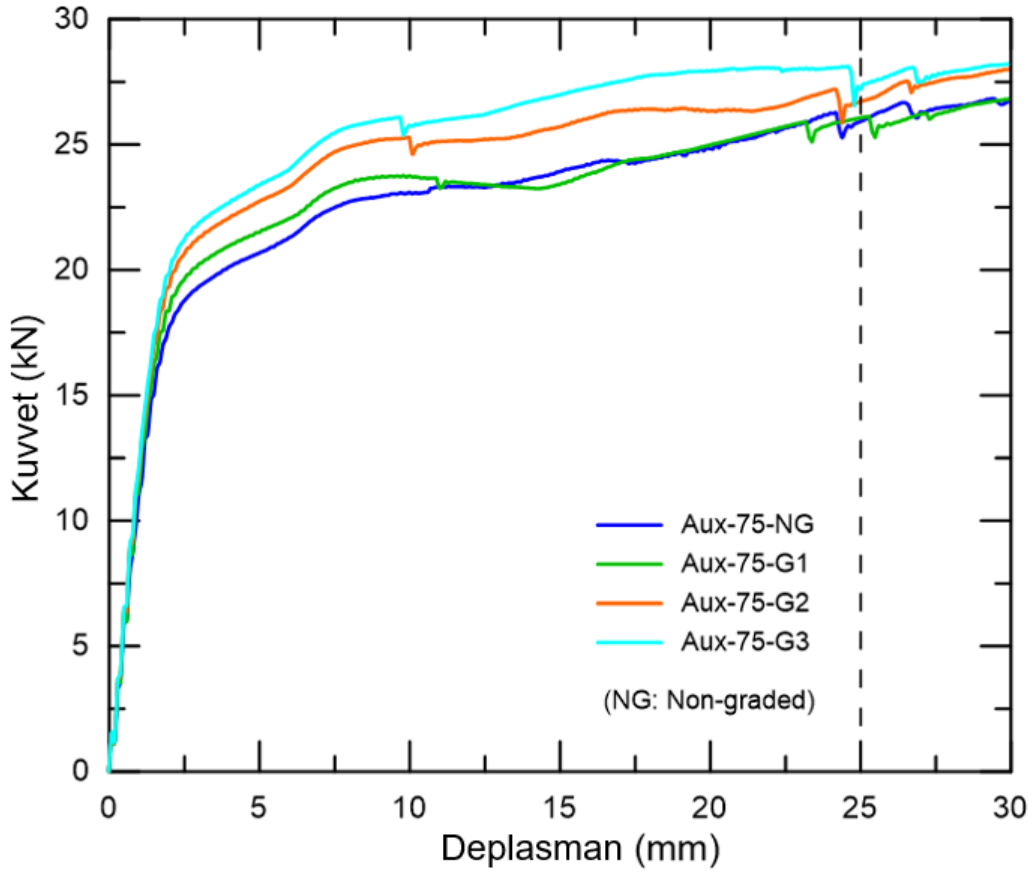
Şekil 6.17. Ökzetik hücre kolu açısındaki değişimin, kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme performansına etkisi.

Şekil 6.17’de, 25 mm’lik bir deplasmana kadar çeşitli hücre kol açılara sahip Aux kirişlerinin maksimum yük taşıma miktarını ve enerji absorbe etme kapasitelerini göstermektedir. Şekil 6.17’de, yük taşıma kabiliyetinin artan hücre kol açısı ile azalan bir oranda arttığını, ancak 75 dereceden sonra artışın önemsiz olduğunu göstermektedir. Enerji absorbe etme kabiliyetindeki değişim de benzer bir davranış göstermektedir. Sonuç olarak, 75 derecelik yapının söz konusu cidar kalınlığı (ve kullanılan malzeme) için ideal olduğu söylenebilir.

6.3.2. Hücre cidar kalınlığının etkisi

Bu bölümde, hücre cidar kalınlığının kesitteki değişiminin Aux-75 kiriş yapısının eğilme davranışı üzerindeki etkisi tartışılmaktadır. Kiriş yapıda eğilme yükü altında, tarafsız eksenin üstündeki alanın basma gerilmesine maruz kaldığı, tarafsız eksenin altındaki alanın ise çekme gerilmesine maruz kaldığı bilinmektedir. Tarafsız ekseninde gerilme sıfıra yakın fakat dış cidarlarda maksimum değeri almaktadır. Bundan dolayı eğilme altındaki çok hücreli kiriş yapıların kesitinde tarafsız eksene yakın bölgelerde hücre cidarı ince tutularak dış cidara doğru kademeli şekilde artış yapının eğilme direncini arttırabileceğini söyleyebiliriz. Katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak cidar kalınlığının homojen olmadığı hücresel yapıların üretimini mümkün kılmaktadır. olarak sağlamaktadır. Önceki bölümde incelenen analizlerle, en iyi mekanik özellikleri gösteren 75 derecelik hücre kol açısına sahip Aux yapısı üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2(c), kiriş kesitindeki ökzetik hücre cidarlarının kalınlığının tarafsız eksenden dış cidarlara doğru kademeli olarak değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Aux-75-Gs yapısının dış cidar kalınlığı Aux yapısı ile aynı değere (0.5 mm) sahiptir.

Aux-75-Gs geometrilerinin üç nokta eğme testi sonuçları Şekil 6.18'de verilmiştir. Başlangıçta, tüm numunelerin elastik davranışı temelde aynıdır ve yükün mandrelin deplasmanla arttığı ve daha sonra yük taşıma kapasitelerinin artış oranının plastik bölgede kademeli olarak azaldığı gözlemlenebilir. Bu davranış esas olarak elastik deformasyonda kesit atalet momentindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

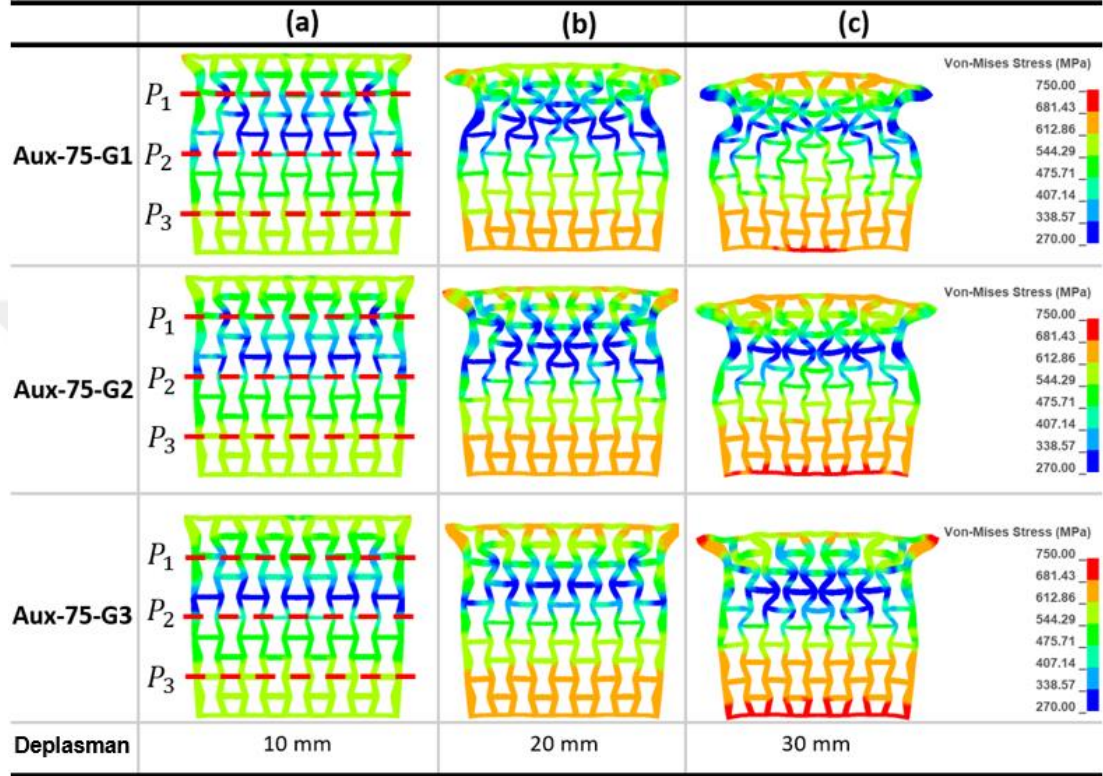


Şekil 6.18. Aux-75 kiriş yapının kesitinde cidar kalınlığının fonksiyonel olarak değişiminin kuvvet-deplasman grafiği üzerine etkisi.

Şekil 6.18'de görüldüğü gibi, yapının yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti, tarafsız eksenden dış cidara doğru ökzetik hücre cidarının kalınlığındaki artış oranıyla birlikte artmaktadır. Hem elastik hem de plastik bölgelerdeki yük taşıma kabiliyetinin artması, kesitin üst cidarındaki burkulmanın artan derecelendirmeye azalmasına bağlanabilir. $d > 22.5$ mm'den sonra dört farklı yapının kuvvet-deplasman grafiklerinin benzer tepkiler verdiği görülmektedir. Bu durum, P_1 düzleminde ve bu düzleme komşu alt düzlemde ökzetik hücre kollarının birbiriyle teması sonrasında birbirleri üzerinde kaymaların hareketlerinin vuku bulması ile açıklanabilir.

Şekil 6.19, Aux-75-Gs'nin hücre cidar kalınlıklarının farklı oranlarda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıların deformasyon şeklini göstermektedir. Hücre kalınlıklarının fonksiyonel olarak derecelendirilmesinin kesit deformasyonunu önemli ölçüde etkilediği görülebilir. Şekil 6.19(b)'de gösterildiği gibi, Aux-75-G1 yapısı için P_1 düzlemindeki ökzetik eğimli hücre cidarları "c" arasındaki mesafe deformasyonla birlikte tamamen kapanmaktadır. Bu nedenle, P_1 düzlemindeki hücre hareketi kısıtlanır ve şekil değişikliği mandrele yakın bir alt düzleme geçer. Ancak, Aux-75-

G2 yapısında aynı deplasmanda P_1 düzleminde dış çepere yakın ökzetik hücre çeperlerinde "c" mesafesinin sıfırlandığı ancak iç bölümde kalan hücre çeperinde "c" mesafesinin azaldığı görülmektedir. Aux-75-G3 yapısında, P_1 düzlemindeki ökzetik hücrelerdeki şekil değişiminin diğer yapılara kıyasla nispeten düşük olduğu Şekil 6.19(b)'de görülmektedir.

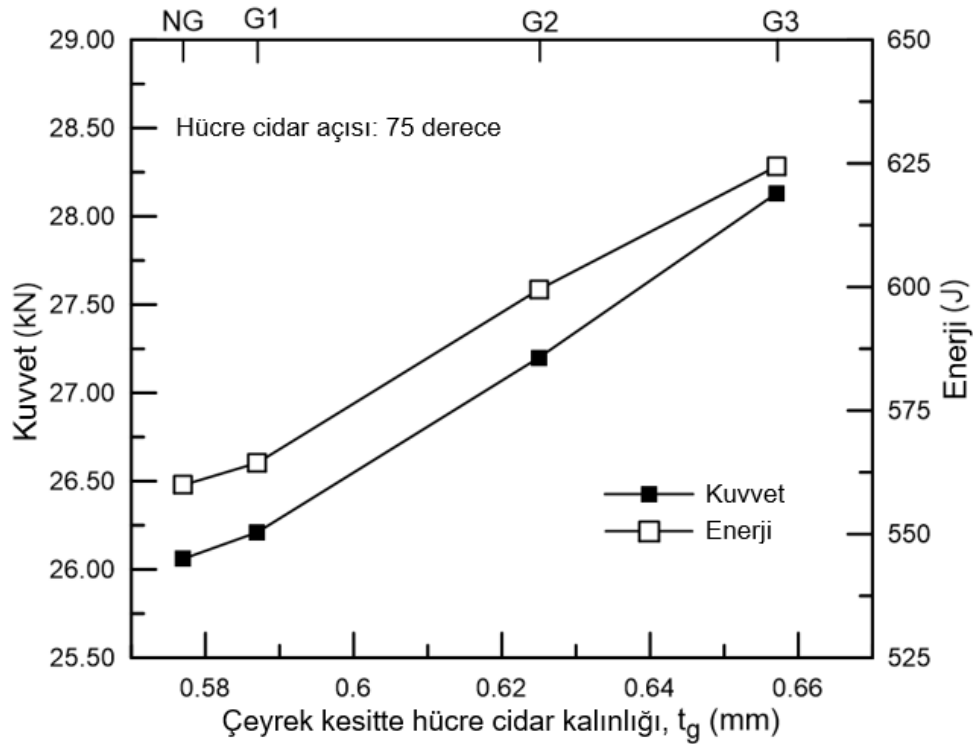


Şekil 6.19. Hücre cidarları fonksiyonel olarak derecelendirilmiş Aux yapıların orta kesitinin deformasyon şekli ve Von-Mises gerilme dağılım diyagramı.

Şekil 6.19(b)'de gösterildiği gibi, Aux-75-G1 yapısı için P_1 düzlemindeki ökzetik eğimli hücre cidarları "c" arasındaki mesafe deformasyonla birlikte tamamen kapanmaktadır. Bu nedenle, P_1 düzlemindeki hücre hareketi kısıtlanır ve şekil değişikliği mandrele yakın bir alt düzleme geçer. Ancak, Aux-75-G2 yapısında aynı deplasman değerinde P_1 düzleminde dış çepere yakın ökzetik hücre çeperlerinde "c" mesafesinin sıfırlandığı ancak iç bölümde kalan hücre çeperinde "c" mesafesinin azaldığı görülmektedir. Aux-75-G3 yapısında, P_1 düzlemindeki ökzetik hücrelerdeki şekil değişiminin diğer yapılara kıyasla nispeten düşük olduğu Şekil 6.19(b)'de görülmektedir.

Aux-75-G yapılarına ait kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde, Aux-75-G3 yapısının SYT'si, neredeyse aynı tepkileri vermesine rağmen, Aux-75-NG'den

(derecelendirilmemiş) yaklaşık %8 daha fazladır. Aux-75-G3 yapısının SEA'sı Aux-75-NG'den yaklaşık %11.5 daha fazladır. Şekil 6.19'da görüldüğü gibi, Aux-75-G3 kiriş kesitinin P_1 ve P_2 düzlemlerindeki deformasyonları Aux-75-G2 ve Aux-75-G1 kiriş kesitlerinden daha düşüktür. Aux-75-G3 kesitinin negatif Poisson oranı bu düzlemlerde daha düşük kalsa da, deformasyonun daha sınırlı olduğu ve dolayısıyla kesit atalet momenti kaybının diğer yapılara göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, Aux-75-G3 yapısı için önemli ölçüde daha yüksek yük taşıma kabiliyeti, geniş bir deplasman aralığında ökzetik hücrelerin aktif çalışmasıyla açıklanabilir. Deformasyonun artmasıyla, P_1 düzlemindeki ökzetik hücre cidarları içe doğru yönlenerken hücreleri merkezde toplanmaya zorlar ve bu nedenle dış cidar içe doğru bükülür ve negatif Poisson etkisi gösterir. Şekil 6.19(a)'da, Aux-75-G1 kiriş kesitinde dış cidarın merkeze doğru deformasyonunun yüksek olduğu ve daha sonra sırasıyla Aux-75-G2 ve Aux-75-G3 kiriş kesitlerinde dış cidarın deformasyonunun azaldığı görülmektedir.

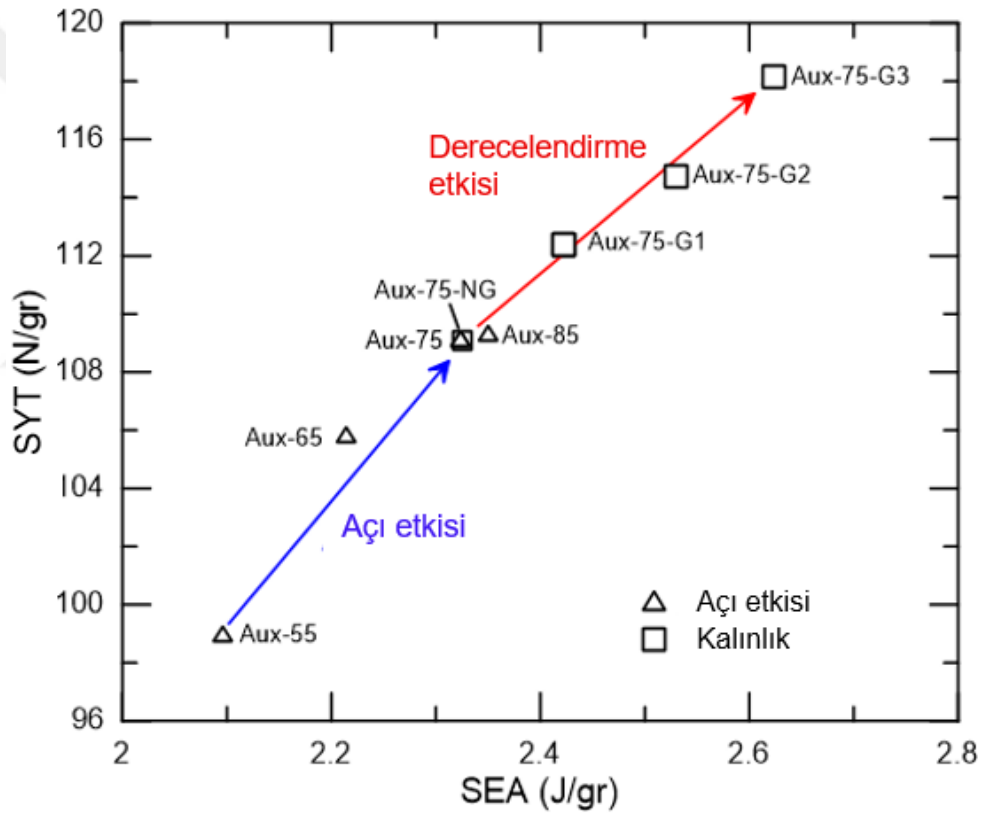


Şekil 6.20. Hücre cidar kalınlığının fonksiyonel olarak derecelendirilmesinin, Aux-75 kirişin yük taşıma ve enerji absorbe etme performansına etkisi.

Şekil 6.20 verilen grafikte 75 derecelik kiriş yapısının yük taşıma kapasitesinin ve absorbe edilen enerjinin kesitteki fonksiyonel derecelendirmeye arttığını göstermektedir. Yük taşıma kapasitesinin ve enerji absorbe etme kapasitesinin

değerlendirilmesinde kirişin ağırlığının da dikkate alınması faydalı olacaktır. Şekil 6.21'de hücre kol açısı ve kademeli kalınlık değişiminin SYT ve SEA değerleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.

Şekil 6.21'de, sabit kiriş ağırlığında hücre kolu açısındaki artışın her iki spesifik değeri de belirli bir değere kadar aynı oranda iyileştirebildiği görülebilir. Buna göre, açının artırılmasıyla SYT ve SEA değerleri sırasıyla %11 ve %12.4 oranında iyileştirilmiştir. Ağırlıktaki artışa rağmen, yapının 75 derecelik hücre kolu açısına sahip en iyi performans gösteren kiriş yapının hücre cidar kalınlığının derecelendirilmesi halinde, SYT ve SEA özgül değerlerinde sırasıyla %19.4 ve %25.4 gibi daha fazla iyileştirmenin gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.21. Hücre kol açısı ve cidar kalınlığının kademeli değişiminin, SYT ve SEA değerleri üzerindeki etkileri.

6.4. Hibrit Kesitli Kiriş Yapıların Eğilme Performansı

Bu bölümde ökzetik kesit ve en az iki farklı hücreden oluşan hibrit kesite sahip kiriş yapıların eğilme performansı incelenmiştir. Hibrit kesite sahip yapılar ökzetik ve farklı çokgen yapılarla kombine edilerek geliştirilerek oluşturulmuştur. Hibrit yapının amacı ökzetik hücrelere sahip kiriş yapılara nazaran daha hafif olmasının yanında yük taşıma

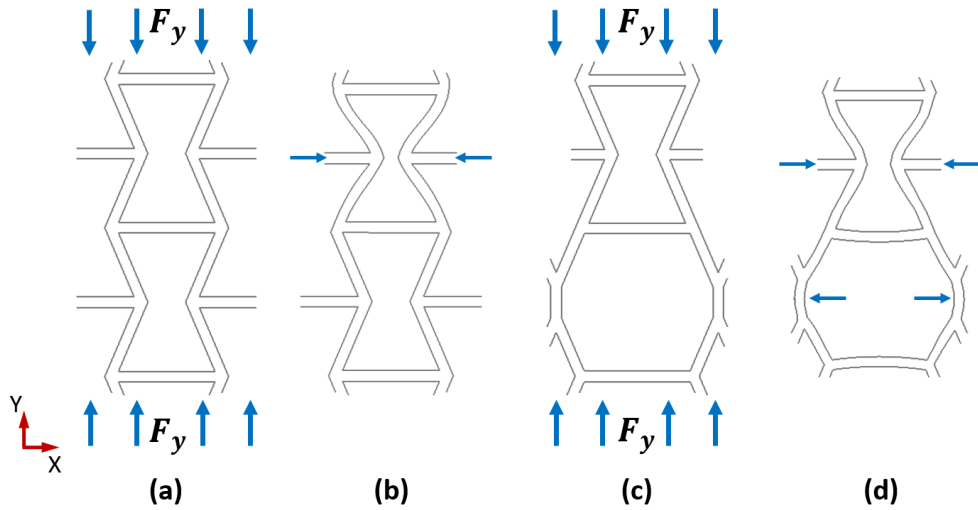
kabiliyetinin dolayısıyla enerji absorbe etme yeteneğinin daha yüksek olmasıdır. Ökzetik (Aux) çok hücreli kirişlerin ve ökzetik ve sekizgen hücreli (AuxOcta) yeni tasarım kirişlerin eğilme tepkisi ve enerji absorbe etme kabiliyeti nümerik ve deneysel olarak sistematik bir şekilde incelenmiştir.

6.4.1. Teorik analiz

Mandrel'in altındaki hücre kollarının deformasyonu, kesitin atalet momenti üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıda, elastoplastik bölgede hücre cidarlarında uygulanan yükün neden olduğu eğilme denklemleri ökzetik ve hibrit yapılar için oluşturulmuştur. Bununla birlikte, yerel burkulma mandrel'in altındaki bölgenin stabilitesiyle doğrudan ilişkili olduğundan, yük altında basma bölgesi altındaki hücrelerin düzlem içi deformasyonunun incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, Aux ve AuxOcta tasarımı için burkulma dayanımının analitik modellerini elde etmek amacıyla, birim hücreye “y” yönlerinde eşit olarak dağılan bir basma kuvveti uygulanmıştır. Kirişin kesme deformasyonu ve basma deformasyonu veya eksenel gerilme göz ardı edildiğinden, hücre kolunun bir Euler-Bernoulli kirişi olduğu varsayılabilir [112].

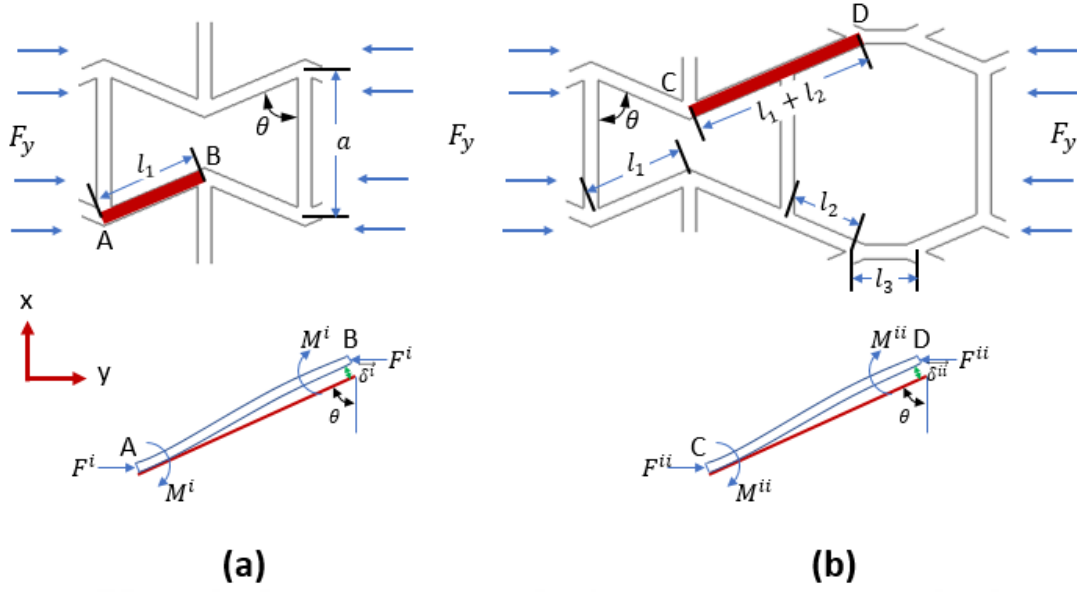
Şekil 6.22(a, c), “y” yönünde eşit olarak uygulanan bir basma kuvvetine maruz kalan 2D Aux ve AuxOcta (hibrit) yapıların birim hücrelerini göstermektedir. Şekil 6.22(c)'de gözlemlenebileceği gibi, iki farklı türdeki birim hücrenin “y” yönünde yük uygulandığında benzer yönde deformasyona uğraması beklenebilir. Bu nedenle, kuvvet analizi ökzetik ve sekizgen hücrelere uygulanmıştır. Ayrıca, varsayımlarımıza göre, eğimli hücre kolu eğilme deformasyonu göstermelidir. Simetriye kuralına dayanarak, belirtilen hücre kollarında Şekil 6.22'de gösterildiği gibi kuvvet analizleri çıkarılabilir.

İki farklı Aux ve AuxOcta yapısı arasında karşılaştırma yapabilmek için düzlem içi basınçlar için analitik denklemler türetilmiştir. Bu denklemler sonucunda yapıların yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmış ve bu kesitlere sahip kiriş yapılar üretilmiştir. Deneysel ve sayısal analizler ilerleyen bölümlerde analitik çözümü daha detaylandıracaktır.



Şekil 6.22. Aux ve AuxOcta kirişinin hücresel yapısının kuvvet analizi: (a) Ökzetik hücrenin “y” yönündeki kuvvetin gösterimi ve (b) Ökzetik hücrelerin tahmini deformasyon davranışı ve (c) Hibrit birim hücrenin “y” yönündeki kuvvetin gösterimi (d) Hibrit konfigürasyonun tahmini deformasyon davranışı.

Şekil 6.22(a) ve (c) sırasıyla "y" yönünde uygulanan bir yüke (F_y) maruz kalan 2D ökzetik ve hibrit yapıların birim hücrelerini göstermektedir. Şekil 6.22(b)'de gözlemlenebileceği gibi, "y" yönünde yük uygulandığında ökzetik hücrelerin üst bölgesindeki hücrenin deformasyonunu tamamladığında alt bölgedeki hücrenin deforme olmaya başlayacağı anlaşılmaktadır. Ancak hibrit yapının hücresel modelinde, uygulanan yük ökzetik ve sekizgen hücreleri birbirine bağlayan ortak hücre kolu vasıtasıyla her iki hücre tarafından taşındığı için Şekil 6.22(d)'de gösterildiği gibi aynı anda deformasyona uğramaları beklenebilir. Bu nedenle, kuvvet analizi ökzetik ve sekizgen hücreler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.23(a) ve (b)'de görülebileceği gibi, simetriye dayalı kuvvet analizi için eğimli bir hücre kolu çıkarılabilir.



Şekil 6.23. “y” yönünde yükleme altında (a) Ökzetik hücrenin, (b) Hibrit hücrenin elastik deformasyonu.

Kuvvet eşdeğer koşullarına göre, “x” yönü boyunca gerilme bileşenleri kirişlerde (AB ve CD) sıfıra eşittir. Böylece, $M^i = \frac{1}{2} F^i l_1 \cos \theta$ denklemi kiriş yapılarında meydana gelen eğilme momentini verir, burada F^i AB kirişi üzerindeki “y” yönündeki kuvveti temsil eder ve “i” ve “ii” karakterleri sırasıyla ökzetik ve hibrit (ökzetik + sekizgen) hücrelere karşılık gelir. Kiriş deformasyon eğrisinin tahmini sapma ilişkisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$W^u = \frac{M(y)}{EI} \quad (6.6)$$

AB ve CD kirişlerinin sınır koşulları şunlardır:

$$A(C) = \frac{w=0}{\theta \neq 0} \text{ ve } B(D) = \frac{w \neq 0}{\theta = 0} \quad (6.7)$$

Eşitlik (6.6) ve (6.7)'e göre, AB kirişinin sehimini aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\delta^i = \frac{M^i l_1^2}{6EI^i} \text{ burada } I^i = \frac{bt^3}{12} \quad (6.8)$$

Burada “E” yapıyı oluşturan malzemesinin elastik modülüdür. Yapısal tasarımda, daha önce bahsedilen koşul sağlanmaktadır ($a < 2l_1 \cos \theta$). Bu nedenle, Eşitlik (6.8)'yı yeniden yazarsak, eşitlik (6.9)'deki gibi bir sonuç elde ederiz:

$$\delta^i = \frac{\sigma_i a b l_1^3 \cos \theta}{24 E I^i} \quad (6.9)$$

Ökzetik hücrenin y yönündeki birim şekil değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\varepsilon^i = \frac{\sigma_i}{2E} \left[\frac{a l_1^2 \cos^2 \theta}{t^3 \sin \theta} \right] \quad (6.10)$$

CD kirişi AB kirişi ile benzer sınır koşulları gösterir, bu nedenle saptması aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\delta^{ii} = \frac{M^{ii}(l_1 + l_2)^2}{6 E I^{ii}} \text{ where } I^{ii} = \frac{b t^3}{12} \quad (6.11)$$

$$\delta^{ii} = \frac{\sigma_{ii}(c + 2a + d + 2(l_1 + l_2) \cos \theta) b (l_1 + l_2)^3 \cos \theta}{48 E I^{ii}} \quad (6.12)$$

Hibrit (ökzetik + sekizgen) hücrenin "y" yönündeki gerilimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{ii} &= \frac{\delta^{ii} \cos \theta}{(l_1 + l_2) \sin \theta} \\ &= \frac{\sigma_{ii}}{4E} \left[\frac{(c + 2a + d + 2(l_1 + l_2) \cos \theta) b (l_1 + l_2)^2 \cos^2 \theta}{t^3 \sin \theta} \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

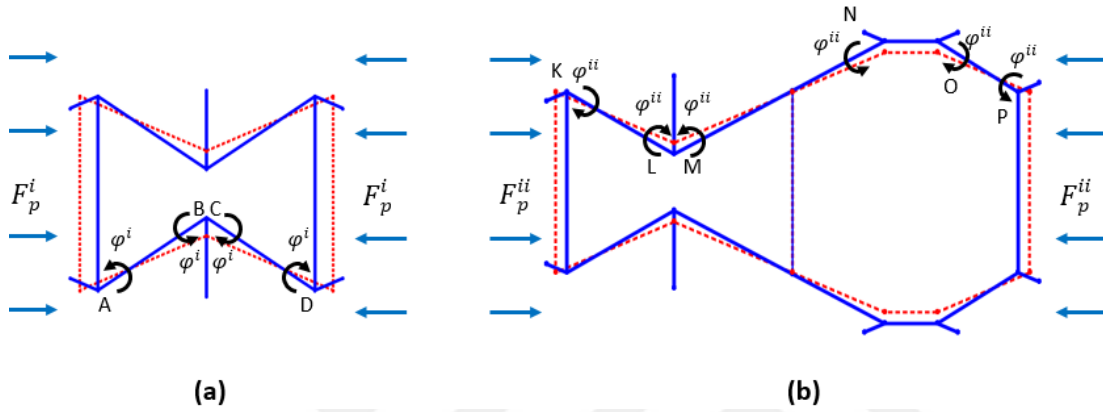
Hücre cidarının eğilme momenti tam plastik momente ulaştığında yapı plastik rejime girer ve bu hasar gerilmesidir. Aux yapısında, ökzetik hücrelerde kademeli bir deformasyon meydana geldiğinden, auxetik hücredeki plastik mafsalların yerleri benzer olacaktır. Kuvvet analiz modelinde hücrenin tek tek analiz edilmesi yeterli olacaktır. Ancak AuxOcta hücre yapısı düşünüldüğünde ökzetik hücre ile sekizgen hücrenin ortak kenara sahip olmasından dolayı deformasyon her iki hücrede de aynı anda görülmektedir. Bu nedenle plastik mafsalların yerleri aynıdır ve kuvvet analizi modeli ile bütünleşik olarak düşünülmelidir.

Geleneksel ökzetik hücrelerde, hasar gerilimi F_p^i kuvvetinin karşılığı olan iş ile elde edilebilir. Kullanılan malzeme elastik-plastik olduğundan, dört plastik menteşe (A, B, C ve D) Şekil 6.24(a)'da gösterildiği gibi plastik rotasyonda (φ) olduğunda,

menteşeler üzerinde gerçekleştirilen plastik iş F_p^i kuvveti tarafından üretilen işe eşittir. Eşdeğer iş için bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$2F_p^i l_1 \varphi^i \cos \theta = 4M_p^i \varphi^i \quad (6.14)$$

burada M_p^i hücre kenarının bükülme sırasındaki tam plastik momenti göstermektedir $M_p^i = \sigma_y b t^2 / 4$, burada σ_y hücre kolu malzemesinin akma gerilmesine eşittir).



Şekil 6.24. (a) Ökzetik hücre ve (b) AuxOcta (ökzetik ve sekizgen) hibrit hücrede y-yönlü yükleme altında plastik mafsall oluşumunun gösterilmesi.

Böylece, geleneksel bir ökzetik birim hücresinin nihai yük kapasitesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_p^i = \frac{\sigma_y b t^2}{2(l_1 - \frac{t}{\sin \theta}) \cos \theta} \quad (6.15)$$

AuxOcta kesit geometrisinden çıkarılan hibrit hücre durumunda, hasar stresi F_p^{ii} kuvveti tarafından yapılan eşdeğer iş ile elde edilir. Aynı şekilde, F_p^{ii} kuvveti tarafından yapılan iş, Şekil 6.22(b)'de gösterildiği gibi plastik rotasyon (φ) altında altı menteşe oluşumu tarafından yapılan işe eşit hale gelmektedir ve bu da aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$8M_p^{ii} \varphi^{ii} = F_p^{ii} l_1 \varphi^{ii} \cos \theta + F_p^{ii} (l_1 + l_2) \varphi^{ii} \cos \theta + F_p^{ii} l_2 \varphi^{ii} \cos \theta \quad (6.16)$$

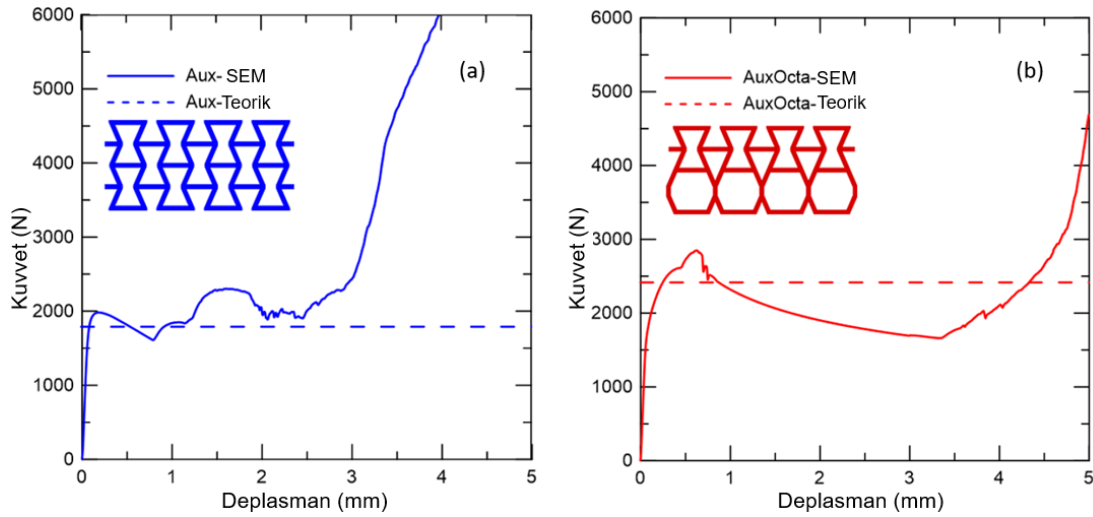
Dolayısıyla, AuxOcta birim hücre konfigürasyonunun maksimum taşıyacağı yük aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$F_p^{ii} = \frac{2\sigma_y b t^2}{\left(2(l_1 l_2 - \frac{t}{\sin \theta})\right) \cos \theta} \quad (6.17)$$

Eşitlik (6.15) ve (6.17)'de. Hibrit yapıdaki hücre kollarının belirli bir deformasyonunun özetik yapıya göre daha yüksek momentler gerektirdiği ve bu nedenle daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu analiz sabit hücre kenarları için gerçekleştirilmiştir. Cidar kalınlığındaki bölgesel bir değişikliğin, kesit deformasyonlarını değiştirerek genel hücreyi ve dolayısıyla kiriş performansını değiştirmesi beklenmelidir.

6.4.2. Aux ve AuxOcta geometrik konfigürasyonların düzlem içi basma dayanımları

Aux ve AuxOcta hücresel yapılarının FE simülasyonlarından elde edilen düzlem içi basma davranışı Şekil 2.23'de sunulmuştur. Şekil 6.25'de ayrıca her iki yapı için bölüm 6.3.1'den türetilen Eşitlik (6.15 ve 6.17) ile hesaplanan plastik hasar kuvvetini de göstermektedir. Eğriler incelendiğinde, deformasyonun genel olarak literatürdekiyle aynı olan elastik deformasyon, plastik deformasyon ve densifikasyon bölgelerinden oluştuğu görülmektedir [14]. Şekil 6.25(a ve b)'de, AuxOcta yapısının basma direnci, Aux hücre yapısına kıyasla doğrusal bölgede önemli ölçüde daha yüksektir. AuxOcta yapısının stabilitesinin nispeten daha yüksek olduğu ve sonuç olarak yük taşıma kapasitesinin daha iyi olduğu görülmektedir. Aux yapısı, aşırı deformasyon altında hücre kolları arasındaki temas nedeniyle eğride ikinci bir tepe noktası gösterir (Şekil 6.25(a)). AuxOcta'nın ilerleyen deformasyonla, pozitif Poisson oranı nedeniyle sekizgen yapının ovalleşmesi nedeniyle kuvvet azalma eğilimindedir. Teorik kuvvetin belirlenmesinde birim hücre dikkate alındığından (hücre kollarının basma yükü altındaki etkileşimi göz ardı edilmiştir), analiz edilen ve hesaplanan kuvvet değerleri arasında bir miktar fark olması beklenmektedir. Burkulmanın hücresel kirişlerin eğilme performansında önemli bir faktör olduğu düşünüldüğünde, AuxOcta yapısının daha iyi stabilitesinin kirişin eğilme performansına katkıda bulunması beklenebilir.

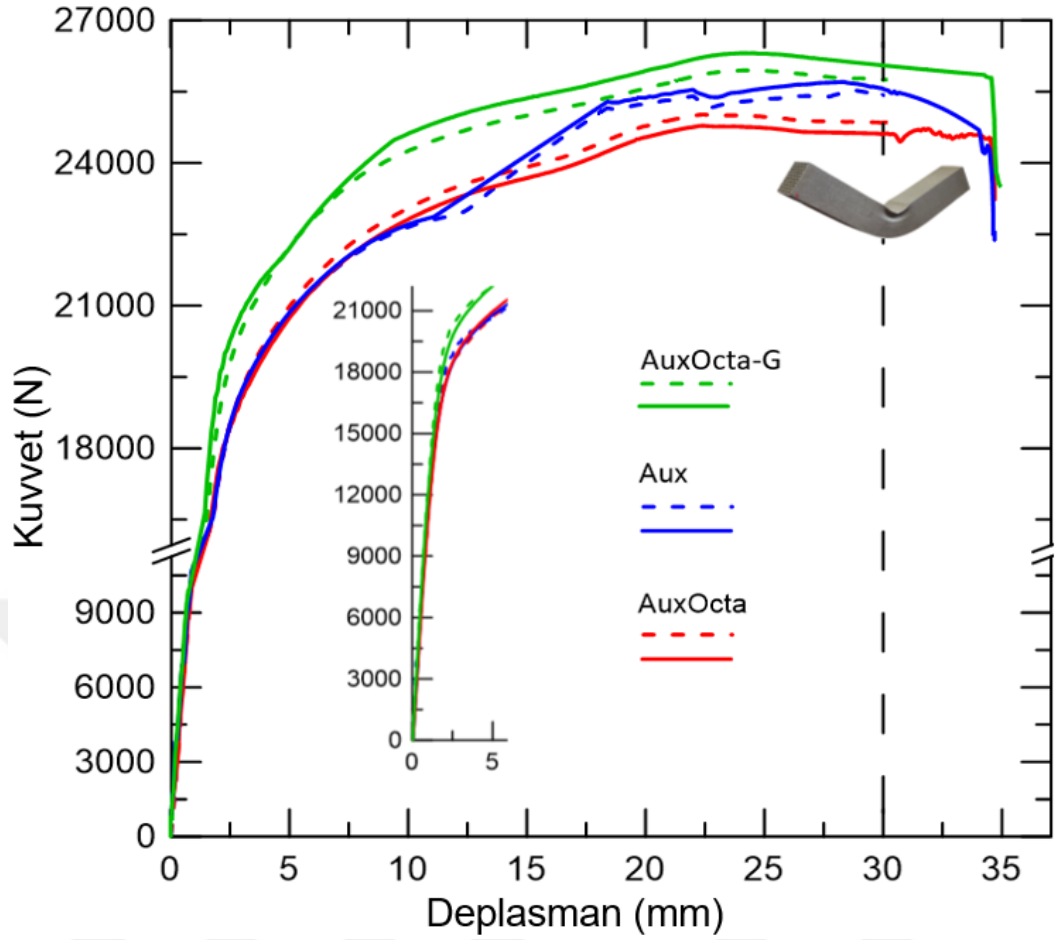


Şekil 6.25. Düzlem içi basma durumları için sonlu eleman simülasyonu ve teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Aux, (b) AuxOcta.

6.4.3. Üç nokta eğme testi

Farklı kesit geometrilerine sahip numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları Şekil 6.26'da verilmiştir. Başlangıçta, her üç numunenin de elastik davranışı temelde benzerdir (iç kısım doğrusal grafikleri göstermektedir) ve yük taşıma kuvveti deplasmanla birlikte arttığı ve daha sonra plastik bölgedeki yük artış oranının kademeli olarak azaldığı görülmektedir.

Özellikle, hibrit yapıların (AuxOcta-G ve AuxOcta) eğrileri deplasman ile azalan bir oranda artmakta ve AuxOcta-G numunesi daha yüksek eğilme performansı sergilemektedir. Bu davranışın ana nedeni, plastik bölgedeki atalet kesit momenti kaybındaki farklılıktır. $d = 10$ mm, Aux yapısının atalet momenti deformasyon öncesi durumuna (8855 mm⁴) kıyasla %14.2 azalmıştır. Aynı deplasmanda, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının atalet kesit momentindeki kayıp sırasıyla %9.2 ve %8.8'dir.

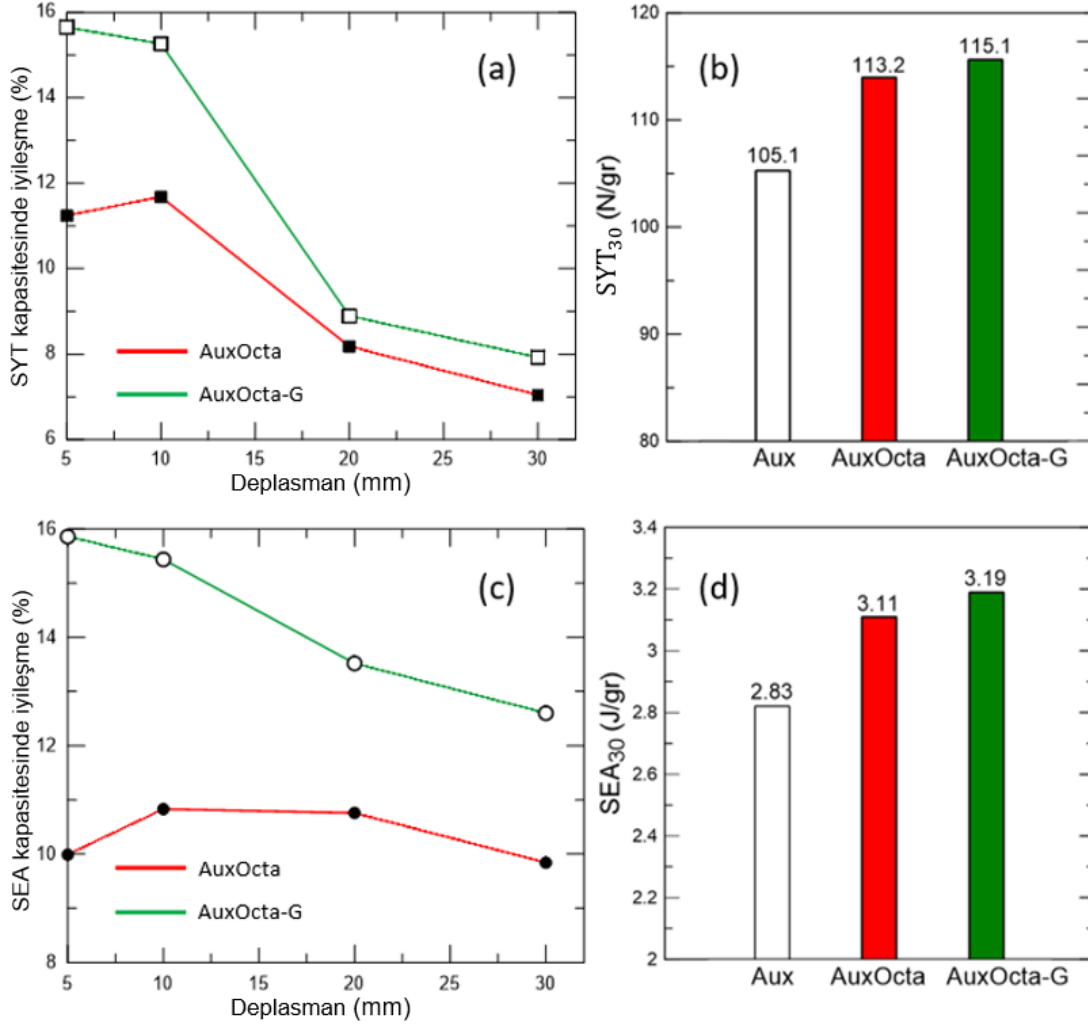


Şekil 6.26. İncelenen üç kesit için yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.

Hibrit yapılara (AuxOcta-G ve AuxOcta) ait grafikte deplasman ile azalan bir oranda artması ve AuxOcta-G numunesinin daha yüksek eğilme performansı sergilemesi de dikkat çekicidir. Öte yandan, diğerlerinden farklı olarak, Aux numunesi yaklaşık 12 mm'lik bir deplasmandan sonra kısa süreli lineer bir artış eğilimi göstermektedir. Bu davranışın, ökzetik hücre kollarının birbiriyle temas meydana geldiğinden dolayı olduğu düşünülmektedir (bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak tartışılmıştır). Hibrit numunelerin eğrilerinin eğimleri 30 mm'den sonra artan deplasman ile önemli bir değişiklik göstermemektedir. Bununla birlikte, hasar deplasmanında da önemli bir fark yoktur. Şekil 6.26'de kesikli çizgilerle gösterilen eğriler 30 mm'lik deplasman için elde edilmiş ve bu numuneler orta noktasından kesilerek kesitteki Poisson oranını dağılımını hesaplamak ve Şekil 6.28'deki grafikleri oluşturmak için kullanılmıştır.

Şekil 6.27(c)'de belirtildiği gibi, AuxOcta yapısının özgül enerji absorbe etme değeri Aux yapısından %10 daha yüksektir. Dolayısıyla AuxOcta yapısının kesitindeki hücre cidarlarının kalınlıkları optimize edilmesi mühendislik yaklaşımı açısından doğru

olacaktır. Bu şekilde maksimum gerilmenin olduğu üst ve alt bölgelere yakın hücre cidarlarının kalınlığı artırılırken, tarafsız eksen üzerindeki hücrelerin cidar kalınlığı azaltılmıştır. Bu sayede hem AuxOcta-G'nin ağırlığı artırılmadan yapının kesit atalet momenti artırılmış hem de kesitteki tüm hücrelerin yük taşımasına yardımcı olmuştur.



Şekil 6.27. Kirişlerin eğilme performanslarının karşılaştırılması: (a) AuxOcta ve AuxOcta-G'nin Aux kirişine göre SYT kapasitelerindeki iyileşme (b) 30 mm'lik deplasman için Aux kirişine göre SYT kapasiteleri, (c) Aux kirişine göre SEA kapasitesindeki iyileşme, (d) 30 mm'lik deplasman için yapıların SEA kapasiteleri.

Önerilen AuxOcta ve AuxOcta-G kiriş yapıların, kesiti tamamen ökzetik hücrelere sahip duruma (Aux) göre performansındaki farkı açıkça göstermek için Şekil 6.27'de verilmiştir.

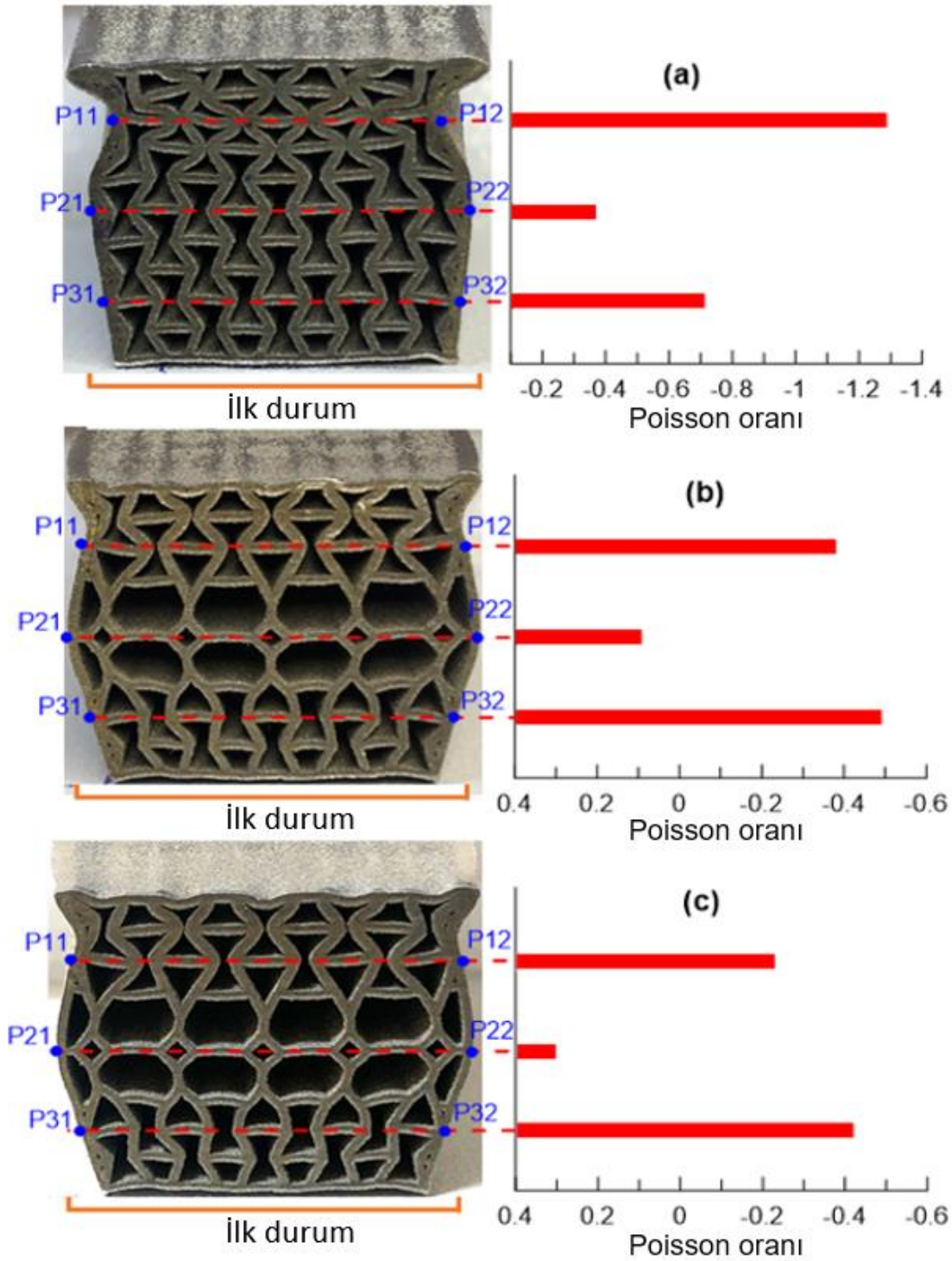
Şekil 6.27'de (a ve c), AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının deplasmana bağlı olarak spesifik yük taşıma (SYT) kapasitesi ve özgül enerji absorbe etme (SEA) kapasitesi, Aux kiriş yapıya kıyasla verilmiştir. Şekil 6.27'de, iyileşmenin her iki değer için de

incelenen deplasmana bağılı olarak değıştığını göstermektedir. Şekil 6.27(a)'dan AuxOcta-G yapısının özellikle küçük deplasman değerlerinde AuxOcta'ya göre daha belirgin bir iyileşme sağladığı görölmektedir. Şekil 6.27(c)'de, 10 mm deplasman için AuxOcta yapısının Aux yapısına kıyasla avantajı daha fazla yük taşıma kapasitesi ve daha hafif olmasıdır. $d = 5$ mm olduğunda, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının Aux yapısına kıyasla spesifik yük taşıma (SYT) kapasitesindeki maksimum iyileşme sırasıyla %15 ve %11'den fazladır. SYT kapasitesindeki iyileşme artan deplasman ile azalsa da, $d = 30$ mm olduğunda, AuxOcta ve AuxOcta-G'nin SYT kapasitesi Aux yapısından sırasıyla %7 ve %8 daha yüksektir. $d = 28.5$ mm olduğunda, Aux kiriş yapısının yük taşıma kapasitesi azalmaya başlarken, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının yük taşıma kabiliyeti plato aşamasında devam etmektedir.

Şekil 6.27(b)'de, AuxOcta yapısında, genel eğilim SEA kapasitesindeki iyileşmenin 5 mm dışında artan deplasmanla ile azalması yönündedir. Başlangıçta, AuxOcta ve AuxOcta-G için SEA kapasitesindeki iyileşme (5 mm deplasman) sırasıyla %10.2 ve yaklaşık %16 iken, 30 mm için hesaplanan iyileşme sırasıyla yaklaşık %10 ve %13'tür. Şekil 6.27(d)'de 30 mm deplasman gibi aşırı deformasyon için hesaplanan SEA kapasitelerinden, önerilen hibrit yapıların (AuxOcta ve AuxOcta-G) diğer Aux yapıya kıyasla önemli bir performansa sahip olduğu görölebilir. Şekil 6.26'te gösterildiğı gibi, üç yapının yük taşıma eğrileri belirli bir kuvvette doyuma ulaşmakta ve bu nedenle birçok mühendislik uygulaması için tercih edilebilir çözümler sunmaktadır. Bu özelliğın, eğilmede ciddi plastik deformasyona maruz kalan kritik bileşenler için umut verici olduğunu belirtmek gerekir.

6.4.4. Poisson oranının dağılımı

Bu kısımda özğün kiriş yapıların kesit görünümleri ve Poisson oranının kesitteki dağılımı tartışılmıştır. Aux, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının 30 mm deplasman sonucunda, Şekil 6.28'de mandrelın temas ettiğı kesitte meydana gelen deformasyon gösterilmektedir.



Şekil 6.28. Kesit geometrileri ve kesitteki Poisson oranının değişimi; (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G, kesit görüntüleri numunelerin 30 mm'lik deplasman sonrası kritik (mandrelin temas noktası) kesitten su jeti ile kesilmesiyle elde edilmiştir.

Aux kiriş yapısı: Şekil 6.28(a)'daki Aux yapılı numunenin kesitindeki deformasyonlar göz önüne alındığında, Aux'un P_{11} - P_{12} düzleminde belirgin bölgesel deformasyon gösterdiği, P_{21} - P_{22} düzleminin altındaki bölgedeki hücrenin ise belirgin bir

deformasyona sahip olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, ökzetik hücrelerin deformasyonu mandrelin bastığı yüzeye yakın görünmektedir. Şekil 6.28(a), P_{11} - P_{12} düzlemindeki ve bu düzleme bitişik üst ve alt düzlemlerdeki ökzetik hücre kollarının merkeze doğru yöneldiğini ve böylece hücreleri merkezde toplanmaya zorladığını göstermektedir. Negatif Poisson oranına sahip hücrelerin karakteristik davranışı nedeniyle, bu düzlemdeki ökzetik hücrelerde "c" mesafesi daralmaya başlar ve P_{11} - P_{12} düzlemindeki kesitin dış cidarları içe doğru bükülmeye başlar. Daha sonra, artan deplasman ile birlikte, P_{11} - P_{12} düzlemine komşu alt ve üst düzlemlerde bulunan ökzetik hücrelerde "c" mesafesi tamamen sıfırlanır. Bu nedenle, Şekil 6.28(a)'da gözlemlenebileceği gibi, P_{11} - P_{12} 'nin Poisson oranı -1.28 ile en düşük değeri alır. Yerel burkulma, geleneksel kiriş yapılar için baskın hasar mekanizmasıdır [31, 113] ve yapının negatif Poisson oranı kazanmasıyla etkisi azaltılmıştır. P_{21} - P_{22} ve P_{31} - P_{32} düzlemlerinde ve çevresinde ökzetik hücre kollarında önemli bir deformasyon gözlenmezken, kesitin dış cidarları içe doğru hareket etmektedir. P_{21} - P_{22} ve P_{31} - P_{32} düzlemlerinin Poisson oranı sırasıyla -0.38 ve -0.71'dir.

AuxOcta kiriş yapıda: Şekil 6.28(b), AuxOcta yapısının 30 mm deplasman sonucunda kesitteki deformasyonu göstermektedir. Şekil 6.26 ve Şekil 6.28(b)'de sırasıyla kuvvet-deplasman eğrisini ve AuxOcta yapısının enine kesitindeki deformasyonu göstermektedir. Eğme yükü altında, P_{11} - P_{12} düzlemindeki ökzetik hücre cidarları içe doğru dönerek hücreleri merkezde toplanmaya zorlar ve yerel bir negatif Poisson oranı etkisi gösterirken, P_{21} - P_{22} düzlemindeki sekizgen hücre kolları dışa doğru hareketi zorlar. AuxOcta yapısının kesitinin üst yarısında yer alan P_{11} - P_{12} düzlemindeki ökzetik hücrelerin şekil değişiklikleri Aux yapısına göre nispeten daha düşüktür. Şekil 6.28(b)'de gösterildiği gibi, AuxOcta yapısındaki ökzetik hücrelerin "c" mesafesinde bir azalma olmasına rağmen sıfır değerini almamaktadır. $d = 30$ mm olduğunda ise, P_{11} - P_{12} düzleminin negatif Poisson oranı -0.38'de kalmaktadır.

Öte yandan, P_{21} - P_{22} düzleminde sekizgen hücrelerin varlığı nedeniyle Poisson oranı yaklaşık 0.1 gibi pozitif bir değere sahiptir. Eğme kuvveti sırasında mandrele yakın hücreler basma yükü taşırken, mandrelden uzak hücreler çekme kuvveti taşır. AuxOcta yapısının kesitinin alt bölgesi eğilme yükü sırasında çekme etkisi altında daralmasına rağmen, P_{31} - P_{32} düzlemindeki hücrelerin ökzetik hücrelerin mekanik özellikleri nedeniyle genişlediği görülmektedir. AuxOcta yapısında ise çekme gerilmesi altında zorlanan alt bölümdeki hücrelerin Aux yapısına göre daha fazla deformasyona

uğradığı ve "c" değerlerinin artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, negatif Poisson oranı yaklaşık -0.5 seviyesinde olup Aux yapısınınkinden daha yüksektir. Ayrıca, sekizgen hücrelerin alt kenarlarının daralması nedeniyle burkulma gösterdiği ve cidara yakın sekizgen hücrelerin daha fazla deformasyona uğradığı fark edilmektedir. AuxOcta yapısının P_{31} - P_{32} düzleminin genişliğinin Aux yapısının genişliğinden daha az dar olmasının, AuxOcta yapısının P_{31} - P_{32} düzlemindeki NPO hücrelerinin şekil değiştirmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Dolayısıyla AuxOcta yapısında tüm kesit eğilme yükünün taşınmasında rol oynamaktadır. AuxOcta yapısında deformasyon nedeniyle hücre kollarının hiçbirine temas edilmediği için Şekil 6.26'da verilen kuvvet-deplasman eğrisinde ani değişimler gözlenmemektedir.

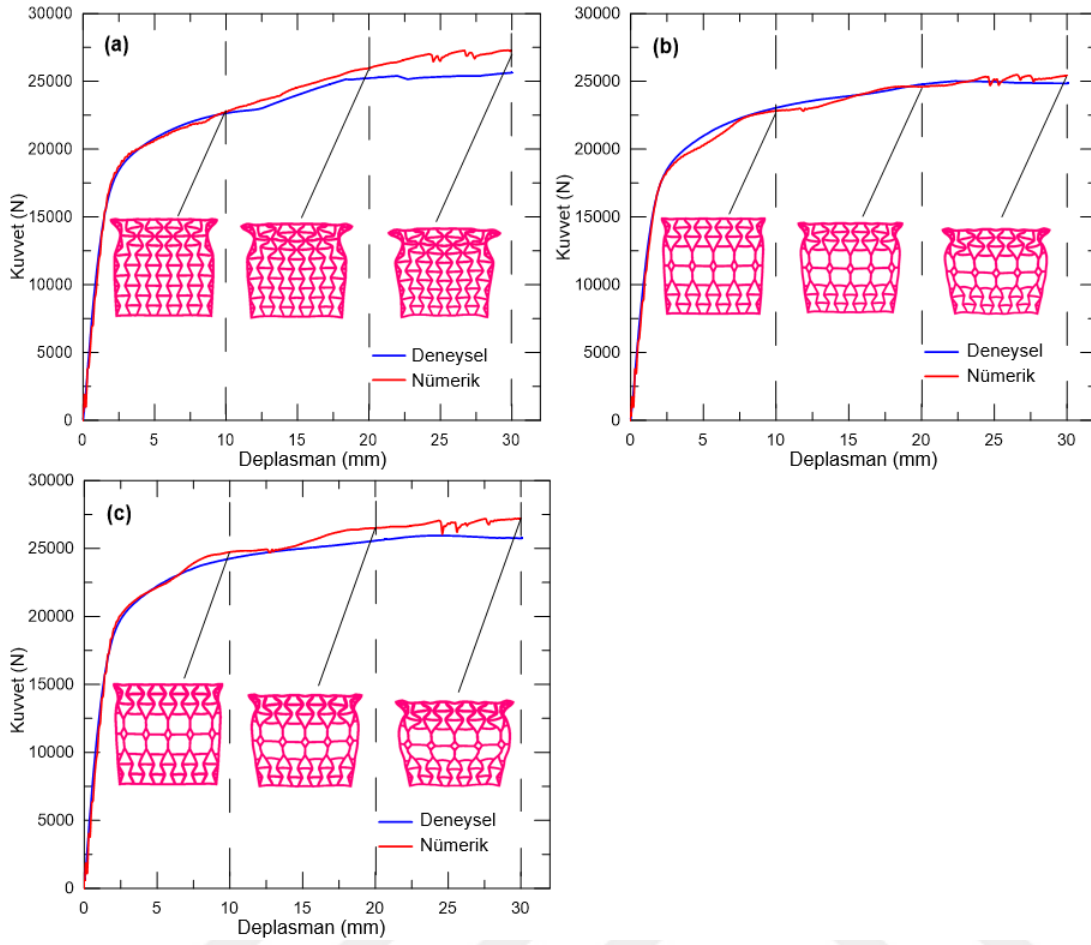
AuxOcta-G giriş yapı: Eğilme kuvveti altında, P_{11} - P_{12} düzlemindeki ökzetik hücre kolları içe doğru dönerek hücreleri merkezde toplanmaya zorlar ve yerel bir negatif Poisson oranı etkisi gösterirken, P_{21} - P_{22} düzlemindeki sekizgen hücre kolları dışa doğru hareketi zorlar. Kesitin üst yarısındaki P_{11} - P_{12} düzleminde negatif Poisson oranına sahip ökzetik hücrelerin "c" mesafesi deformasyonla azalsa da tamamen kapanmaz ve P_{11} - P_{12} düzleminin Poisson oranı Aux ve AuxOcta yapılarına kıyasla daha büyük bir değer (-0.28) alır. Öte yandan, eğilme yükü altında P_{21} - P_{22} düzlemindeki sekizgen hücrelerin Poisson oranlarının pozitif olması nedeniyle hücre kolları dışa doğru yönelmektedir.

Şekil 6.28(c), AuxOcta-G yapısının P_{31} - P_{32} düzlemindeki negatif Poisson oranının diğer yapılardan daha düşük olduğunu göstermektedir. Şekil 6.28(c)'de görüldüğü gibi, AuxOcta-G giriş kesitinde P_{11} - P_{12} ve P_{31} - P_{32} düzlemlerindeki Poisson oranı AuxOcta yapısından daha yüksektir. AuxOcta-G kesitinin negatif Poisson oranı bu düzlemlerde daha düşük kalsa da şekil değişiminin daha sınırlı olduğu ve dolayısıyla kesit atalet momentindeki kaybın diğer yapılara göre daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, AuxOcta-G yapısında taşınan yükün önemli ölçüde yüksek olması, ökzetik hücrelerin geniş bir deplasman aralığında aktif olarak çalışmasıyla açıklanabilir. Bu grup numunelerde "c" mesafesinde azalma olmasına rağmen hücre kolları birbiriyle temas halinde değildir ayrıca, daha ince kollara sahip sekizgen hücrelerde önemli bir deformasyon artışıda görülmemektedir (Şekil 6.28). Dolayısıyla bu gruptaki numunelerde kesitin nispeten daha homojen deformasyona uğradığı açık bir şekilde ifade edilebilir.

Sekizgen ve ökzetik hücrelerin bir arada bulunduğu hücre yapısında, ortak uzuv nedeniyle her iki hücrede de eş zamanlı olarak hücresel deformasyon gözlenmektedir. Ancak sadece ökzetik hücrelerle donatılmış kesitte sadece ökzetik hücrelerde deformasyon gözlenmektedir. Dolayısıyla, hibrit yapının deformasyonu, aynı deplasman aralığında yükün sadece ökzetik hücreler tarafından değil, aynı zamanda sekizgen hücreler tarafından da taşındığını ve hibrit yapının yük taşıma kapasitesinde önemli oranda artışa neden olduğunu göstermektedir.

6.4.5. Sonlu elemanlar analizi ve doğrulama

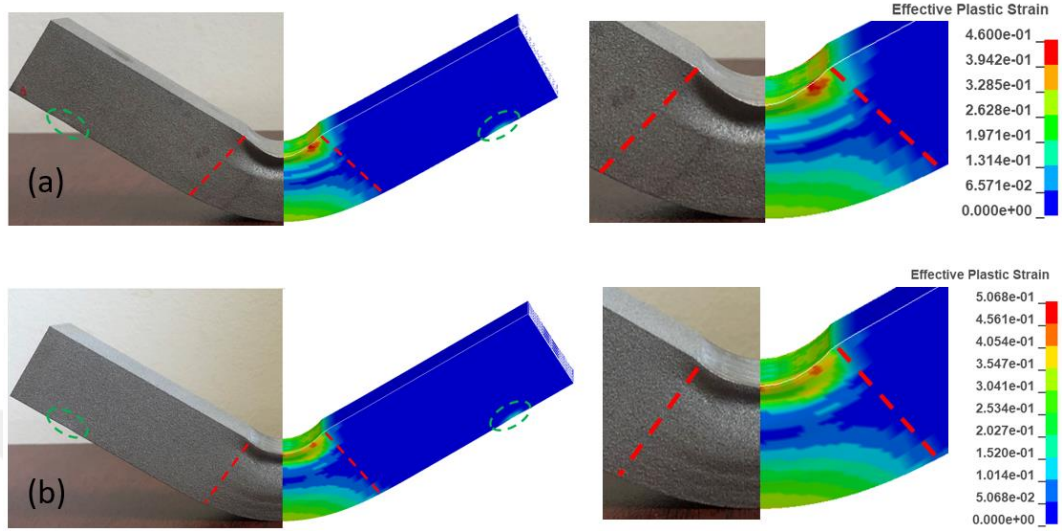
Şekil 6.29(a-c), Aux, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarının nümerik analizleri karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve elde edilen kuvvet-deplasman grafiğini deneysel sonuçlarla birlikte gösterilmektedir. Şekil 6.29'da gözlemlenebileceği gibi, tüm eğriler başlangıçta elastik bölgede tam uyum gösterirken plastik bölgede birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Aux yapısı için, plastik bölgedeki analiz ve deneysel sonuçlar arasındaki fark ortalama %2 civarındadır ve ilerleyen deformasyonla 22.5 mm'den sonra %6.2'lik maksimum değere ulaşmaktadır (Şekil 6.29(a)). AuxOcta numunesi için deneysel ve sayısal analiz arasındaki farkın çok daha küçük olduğu bildirilmesine rağmen, AuxOcta-G yapısı için en önemli sapma %4.9 olarak bulunmuştur.



Şekil 6.29. Deneyisel ve sonlu eleman eğme sonuçlarının karşılaştırılması (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G.

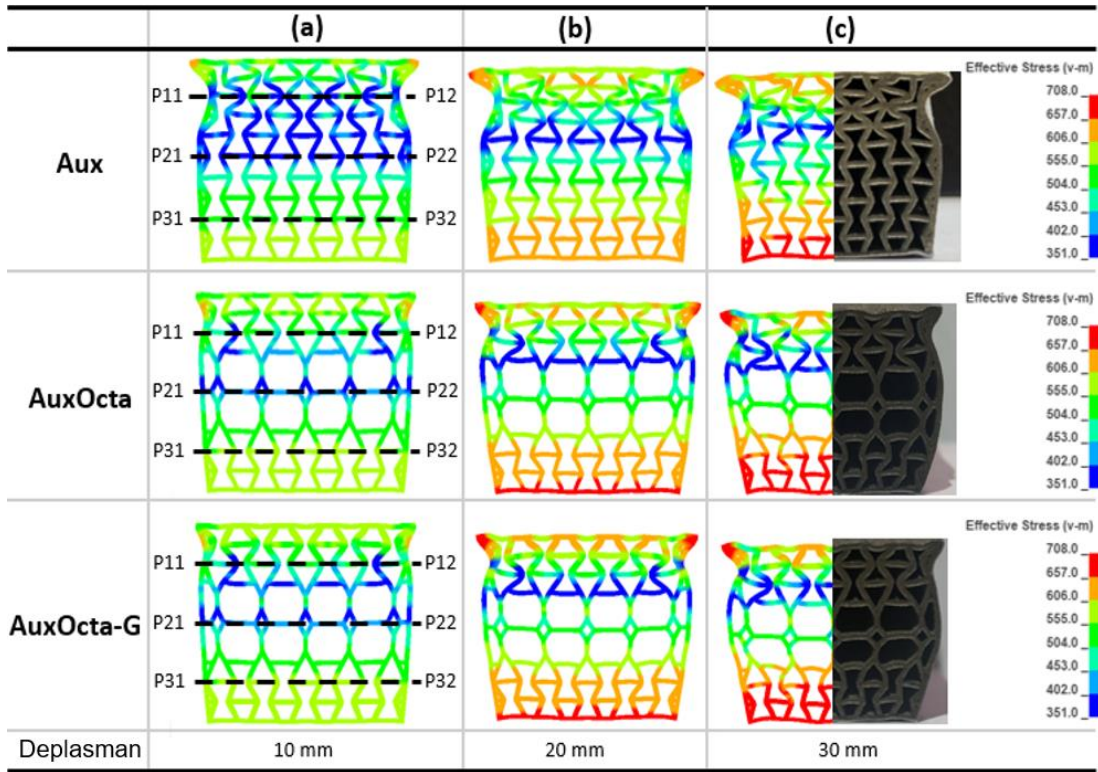
Şekil 6.30'da mandrelin 30 mm deplasman sonrasında Aux yapının dış cidarının deformasyonunu göstermektedir. Şekil 6.30(a)'da gösterildiği gibi, Aux kiriş ile mandrelin temas ettiği bölgede yerel deformasyon gözlenirken, kirişin diğer kısımlarında önemli bir deformasyon gözlenmemektedir. Kiriş yapısındaki deformasyon iki kırmızı noktalı çizgi aralığında ve yeşil noktalı çizgilerin bulunduğu temas noktalarında görülebilir. Şekil 6.30(b)'de görüldüğü üzere, AuxOcta kirişindeki deformasyonun mandrele yakın ökzetik hücrelerde ve ayrıca tarafsız eksen üzerinde konumlandırılmış sekizgen hücrelerde görüldüğü anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, AuxOcta kiriş kesiti global deformasyon gösterirken Aux kesiti lokal deformasyon göstermektedir. AuxOcta ve AuxOcta-G kiriş yapıları arasında dış cidarın deformasyonundaki fark, dışa doğru yönelme miktarıdır ve bu deformasyon farkı aşağıda ayrıntılı olarak tartışılacaktır. Kirişin enine kesitinde ökzetik hücrelerin bulunması, dış cidarın içe doğru bükülmesine neden olarak birincil hasar mekanizması olan yerel burkulmayı etkili bir şekilde etkisini azaltabilir veya ortadan kaldırır. Aux

ve AuxOcta yapılarının plastik deformasyonları kiriş kesitinin ilerleyen bölümlerinde geniş bir şekilde ele alınacaktır. Sonuç olarak, kiriş kesitinin bu belirli bölgesindeki hücre deformasyonunun kapsamlı bir analizi zorunludur.



Şekil 6.30. Kiriş yapılarının gerinim (Von-Mises) dağılımı (a) Aux, (b) AuxOcta 30 mm deplasman sonrasında.

Şekil 6.31'de aynı ölçekte Aux, AuxOcta ve AuxOcta-G kirişler için sırasıyla 10 mm, 20 mm ve 30 mm deplasman sonrasında sonlu elemanlar analizi sonucunda kirişlerin orta noktasındaki kesitlerde meydana gelen deformasyonlar ve Von-Mises stress dağılımı gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 6.31(c)'de 30 mm deplasman sonrasında kesit deformasyonlarının nümerik ve deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.31. Ökzetik ve hibrit kirişlerin farklı deplasman değerleri için (10, 20 ve 30 mm) kritik kesitteki deformasyon ve Von-Mises gerilme dağılımı. 30 mm deplasman için gerçek numunede elde edilen deformasyon durumunun karşılaştırılması: (a) Aux, (b) AuxOcta ve (c) AuxOcta-G.

Şekil 6.31(a)'da Aux yapısının 10 mm deplasmandaki görüntüsü incelendiğinde kesitin daha fazla boyutsal deformasyona uğradığı görülmektedir. $d=10$ mm deplasman için P_{11} - P_{12} ve P_{21} - P_{22} düzlemleri arasındaki ökzetik hücrelerde plastik deformasyon gözlenmezken ($\sigma_y = 402.3 \text{ MPa}$) efektif gerilme kiriş kesitinin üst ve alt bölgesinde daha büyük değerler almaktadır. Üst yarı kesitin deplasmanla birlikte yerel deformasyonunun Aux kirişinin atalet momentinde %14,2'lik bir kayba neden olduğu hesaplanmıştır. $d = 20$ mm, basma gerilmesi altında çalışan kesitin üst yarısında deformasyon, hücre kollarının P_{11} - P_{12} düzlemindeki teması ile bu düzlemde deformasyonu kısıtlanmaktadır. Daha sonra, Aux yapısının P_{11} - P_{12} düzlemine komşu olan alt ve üst düzlemlerde bulunan ökzetik hücrelerde temas sonrasında hücre kollarının birbirleri üzerinde kaymaya zorlandığı görülmektedir (Şekil 6.31(b)). Özellikle, P_{11} - P_{12} ve P_{21} - P_{22} düzlemleri arasındaki ökzetik hücreler merkeze doğru yönelme eğilimindedir ve bu yönelim 30 mm deplasmanda yoğunlaşmaktadır (Şekil 6.31(c)). Aux yapısının enine kesitinin kademeli bir deformasyona uğradığı anlaşılmaktadır. Hücre kollarındaki temas ve ardından gelen kayma hareketi, Şekil 6.26'da verilen kuvvet-deplasman grafiğindeki zikzakların oluşumunu açıklamaktadır.

Şekil 6.31(b)'de gösterilen AuxOcta yapısında, boyutsal deformasyon nispeten daha az olmasına rağmen, kesitteki akma gerilmesinin Aux yapısına göre daha yaygın olduğu dikkat çekmektedir. Öte yandan, aynı deplasman değerleri (10 mm) için AuxOcta-G yapısı akma alanında önemli bir farklılık göstermez, ancak kesitin üst yarısındaki sekizgen hücrelerin üst yatay cidarında akma gerilmesine henüz erişmemiştir. AuxOcta-G yapısındaki bu davranış, ökzetik hücre cidar kalınlığının optimize edilmesinin hücrelerin aktif çalışma deplasman aralığında ve dolayısıyla şekil değişimine karşı direncini artırmasıyla açıklanabilir. Gerçekten de, AuxOcta-G'nin (%8.8) kesit atalet momentindeki kayıp, AuxOcta (%9.2) ve Aux (%14.2) yapılarından daha düşüktür. Sonuç olarak, 10 mm deplasman için yük taşıma kapasiteleri Aux, AuxOcta ve AuxOcta-G için sırasıyla 23042 N, 23212 N ve 24735 N olarak belirlenmiştir (Şekil 6.26). Modifiye edilmiş AuxOcta-G yapısının Aux yapısına göre hem %7.75 daha hafif olması hem de %9.2 daha fazla yük taşıması tasarımın başarısını göstermektedir.

$d = 20$ mm deplasman değerinde, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarında artan yüke rağmen ökzetik hücrelerin kolları arasında temas olmadığı, ancak AuxOcta yapısında P_{11} - P_{12} düzlemindeki ökzetik hücrenin alt cidarlarında plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Her iki yapıda da maksimum gerilmenin alt cidar yüzeyinde ve üst cidarın köşesinde en yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 6.31(b, c)). AuxOcta-G kesitinin kollarının kalınlığının optime edilmiş olması nedeniyle, kesitin bağıl atalet momenti daha yüksektir, bu da bu yapının daha iyi eğilme performansı sergilemesine yol açar (Şekil 6.26). $d = 30$ mm, AuxOcta ve AuxOcta-G yapılarında, kesitin üst bölgesindeki ökzetik hücre kollarında burkulma meydana geldiği, ancak kolların P_{11} - P_{12} düzleminde birbirine temas etmediği görülmektedir. AuxOcta yapısındaki sekizgen hücrelerin üst cidarı hariç, her iki hibrit yapının da benzer plastik deformasyon alanlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, AuxOcta-G yapısı için %7 daha yüksek anlık atalet momenti nedeniyle yük taşıma kapasitesi nispeten daha yüksektir.

Nümerik ve deneysel analizlerin yük-deplasman sonuçları Şekil 6.29'da gösterildiği gibi iyi bir uyum içindedir. Ayrıca, Şekil 6.30 ve 6.31(c)'de sonlu elemanlar analizinin kesitlerdeki şekil değişimleri gösterilmekte ve deneysel çalışma 30 mm'lik deplasman sonuçları arasında yüksek bir benzerlik olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla bu sonuçlar sonlu elemanlar modellerinin başarısını göstermektedir.



7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Genel Sonuçlar

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar üç başlık altında sıralanırsa ilk bölümde; kesiti ökzetik ve ökzetik olmayan (klasik) çok hücreli petek geometrilerden oluşan kiriş yapıların üç nokta eğilme performansı ve hasar davranışlarının sistematik olarak incelenmiştir. İkinci bölümde ise; Aux yapılarının hücre kol açısı ve hücre cidar kalınlığının (fonksiyonel olarak arttırılmış) eğilme davranışına olan etkileri deneysel ve nümerik yardımıyla detaylı olarak araştırılmıştır. Aux kiriş yapılarının yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Son bölümde; Aux ve tez kapsamında önerilen özgün bir tasarım olan hibrit (AuxOcta) kiriş yapılar, lokal burkulma etkisi incelenmiş ve önerilen kesit geometrilerinin elastik-plastik bölgedeki eğilme davranışı sistematik olarak analiz edilmiştir. Bu tez çalışmasında öne çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- İnce cidarlı (boş tüp) kare kirişin eğme zorlanması altında üst yüzeyde meydana gelen lokal burkulma kirişin yük taşıma kabiliyeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mandrelin temas bölgesine komşu cidarın hasar oluşum bakımından kritik olduğu, ayrıca hasar oluşum deplasmanı, kuvvetin en büyük değerini aldığı deplasman değerine göre nispeten daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- Çok hücreli petek yapıların kirişin eğilme davranışına ve dolayısıyla enerji absorbe etme kapasitesine üzerinde önemli bir rol oynamakta ve içi boş muadillerine kıyasla, daha üstün performans sergilemektedir.
- Kare, 6gen ve 8gen kiriş yapıları için hasar, hücre cidarlarındaki burkulmanın sonucu oluşun lokalize gerilme nedeniyle meydana gelmektedir. Özellikle 6gen kiriş yapısında deformasyon, mandrelin temas ettiği üst köşede, altıgen hücrenin mafsallık noktalarında yoğunlaşmakta, bu nedenle de hasar düşük deplasmanlarda meydana gelmektedir. Erken hasar oluşumu nedeniyle, özgül yük taşıma kabiliyeti petek yapı kesitleri arasında en düşük seviyede kalmıştır.

- İncelenen farklı hücre kesitlerinin performansının değerlendirilmesinde KAM'daki değişimle birlikte kiriş hacmi ve hasar deplasmanının da dikkate alınması faydalı olacağı anlaşılmıştır. Boyutsuz bir büyüklük olarak önerilen “hasar duyarlılığı” veya “hasara duyarlılık” ifadesi önerilmiş ve bunun 6gen kiriş hücreli kiriş için en yüksek, Aux hücreli kiriş içinse en düşük olduğu görülmüştür.
- Kirişin ökzetik kesitinin NPO özelliği nedeniyle, eğilme yükü altındaki kiriş yapılarda ana hasar mekanizması olan yerel burkulma etkisinin daha az olduğu, böylece ökzetik hücreli kirişin nispeten yüksek eğilme momentleri altında hasarlanma eğiliminin daha düşük kaldığı ve geniş bir deplasman aralığında çalışarak yüksek enerji sönümleyebilir olduğu belirlenmiştir. Ökzetik hücreli yapı spesifik enerji absorbe etme yeteneği bakımından, Kare ve 8gen'e göre sırasıyla 3.8 ve 1.8 kat daha fazla performans gösterdiği bulunmuştur.
- Aynı ağırlığa sahip ökzetik kiriş yapılarda, hücre kol açısının belirli bir değerine kadar (75 dereceye kadar), yük taşıma kapasitesi ve deformasyon kararlılığının önemli ölçüde iyileştirilebilir olduğu saptanmıştır. Aux-85 yapısında (kalın cidarlı ve kol açısı yüksek) kesitin ökzetik davranışını sınırlandırmış ve erken hasar oluşumuna teşvik ettiği anlaşılmıştır. En iyi performans, Aux-75 kiriş yapısında elde edilmiş ve buna SYT kapasitesi %11 oranında, SEA kapasitesi ise %12.4 oranında iyileştirilmiştir.
- En iyi hücre açısına sahip (75 derece) ve cidar kalınlığı fonksiyonel olarak derecelendirilmiş durumda parça ağırlığında artışına rağmen, SYT ve SEA'da sırasıyla %19.4 ve %25.4 oranında iyileşmenin mümkün olduğu anlaşılmıştır.
- Hibrit geometriden oluşan kiriş kesiti sekizgen hücrelerin varlığından dolayı ökzetik hücrelerin çalışma aralığını arttırmış ve hibrit kesitin daha yüksek deplasmanlarda kuvvet-deplasman grafiğinde dalgalanma meydana gelmeden sürekli artan trende sahip olduğu bulunmuştur.
- AuxOcta yapıda, hücre cidar kalınlıkları optimize edilmesi halinde, yük taşıma ve enerji absorbe etme kapasitesi önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Önerilen AuxOcta-G yapısı, Aux ile karşılaştırıldığında, AuxOcta-G yapısının spesifik yük taşıma (SYT) kapasitesindeki iyileşme 5 mm deplasman için %15

iken, spesifik enerji absorbe etmedeki (SEA) gelişim yaklaşık %16'ya ulaşmaktadır.

7.2. Öneriler

Kesitinde ökzetik hücreler bulunan kiriş yapı, eğilme altında uygun süneklik, yüksek yük taşıma ve enerji emme kapasitesi sergilemektedir. Otomobillerin tampon kirişleri gibi enerji absorbe etme ve çarpışmadan kaçınma alanlarında kullanılması beklenmektedir. Ayrıca, kiriş kesitinde ökzetik hücrelerin sayısı, hücre boyutları ve hücre cidar kalınlıklarının optimizasyon yöntemi kullanılarak parametrelerin belirlenmesi daha sonraki çalışmalar için olumlu olacaktır.

Önerilen ökzetik ve hibrit kiriş yapılarının mekanik davranışı yöne bağımlıdır. Bu nedenle, bu yeni kiriş tasarımının mekanik davranışının yöne bağımlılığını ortadan kaldırmak için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, hibrit yapıların hücrelerinin hafif köpük malzemelerle doldurulmasının enerji emme kapasitesini önemli ölçüde artırması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] G. Fontaras, N. G. Zacharof, and B. Ciuffo, "Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60. 2017. doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.004.
- [2] M. Goede, M. Stehlin, L. Rafflenbeul, G. Kopp, and E. Beeh, "Super Light Car-lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration," *European Transport Research Review*, vol. 1, no. 1, 2009, doi: 10.1007/s12544-008-0001-2.
- [3] J. Njuguna, *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*. 2016. doi: 10.1016/C2014-0-02646-9.
- [4] M. Vesenjak, I. Duarte, J. Baumeister, H. Göhler, L. Krstulović-Opara, and Z. Ren, "Bending performance evaluation of aluminium alloy tubes filled with different cellular metal cores," *Compos Struct*, vol. 234, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111748.
- [5] H. S. Abdullahi and S. Gao, "A novel multi-cell square tubal structure based on Voronoi tessellation for enhanced crashworthiness," *Thin-Walled Structures*, vol. 150, 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106690.
- [6] F. Wu, Y. Chen, S. Zhao, Y. Hong, Z. Zhang, and S. Zheng, "Mechanical properties and energy absorption of composite bio-inspired multi-cell tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 184, 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110451.
- [7] N. Qiu, Y. Gao, J. Fang, G. Sun, and N. H. Kim, "Topological design of multi-cell hexagonal tubes under axial and lateral loading cases using a modified particle swarm algorithm," *Appl Math Model*, vol. 53, 2018, doi: 10.1016/j.apm.2017.08.017.
- [8] S. Houliara and S. A. Karamanos, "Buckling and post-buckling of long pressurized elastic thin-walled tubes under in-plane bending," *Int J Non Linear Mech*, vol. 41, no. 4, 2006, doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2005.11.002.
- [9] M. D. O'Shea and R. Q. Bridge, "Local Buckling of Thin-walled Circular Steel Sections with or Without Internal Restraint," *J Constr Steel Res*, vol. 41, no. 2–3, 1997, doi: 10.1016/S0143-974X(97)80891-7.
- [10] G. D. Caserta, L. Iannucci, and U. Galvanetto, "Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner," 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.05.029.
- [11] A. Nazir *et al.*, "Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials," *Materials and Design*, vol. 226. 2023. doi: 10.1016/j.matdes.2023.111661.

- [12] N. S. Ha and G. Lu, "A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications," *Compos B Eng*, vol. 181, p. 107496, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107496.
- [13] Q. Zhang *et al.*, "Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire human innovation," *Progress in Materials Science*, vol. 74, 2015. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.05.001.
- [14] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids: Structure and properties, second edition*. 2014. doi: 10.1017/CBO9781139878326.
- [15] S. A. Galehdari and H. Khodarahmi, "Design and analysis of a graded honeycomb shock absorber for a helicopter seat during a crash condition," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 21, no. 3, 2016, doi: 10.1080/13588265.2016.1165440.
- [16] A. Sethi, P. R. Budarapu, and V. R. Vusa, "Nature-inspired bamboo-spiderweb hybrid cellular structures for impact applications," *Compos Struct*, vol. 304, 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116298.
- [17] Q. Zhang *et al.*, "Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire human innovation," *Progress in Materials Science*, vol. 74, 2015. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.05.001.
- [18] J. Bai, G. Meng, H. Wu, and W. Zuo, "Bending collapse of dual rectangle thin-walled tubes for conceptual design," *Thin-Walled Structures*, vol. 135, 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.11.014.
- [19] D. Bilston, D. Ruan, A. Candido, and Y. Durandet, "Parametric study of the cross-section shape of aluminium tubes in dynamic three-point bending," *Thin-Walled Structures*, vol. 136, 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.12.032.
- [20] Y. Nian, S. Wan, M. Li, and Q. Su, "Crashworthiness design of self-similar graded honeycomb-filled composite circular structures," *Constr Build Mater*, vol. 233, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117344.
- [21] X. Zheng *et al.*, "Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials," *Science (1979)*, vol. 344, no. 6190, 2014, doi: 10.1126/science.1252291.
- [22] E. İ. Albak, "Optimization for multi-cell thin-walled tubes under quasi-static three-point bending," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 5, 2022, doi: 10.1007/s40430-022-03525-8.
- [23] I. Kallina, F. Zeidler, K. Baumann, and D. Scheunert, "The offset crash against a deformable barrier, a more realistic frontal impact," *Proceedings: International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, vol. 1995, 1995.
- [24] T. Hilditch, D. Atwell, M. Easton, and M. Barnett, "Performance of wrought aluminium and magnesium alloy tubes in three-point bending," *Mater Des*, vol. 30, no. 7, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.11.020.
- [25] M. Su, H. Wang, and H. Hao, "Axial and radial compressive properties of alumina-aluminum matrix syntactic foam filled thin-walled tubes," *Compos Struct*, vol. 226, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111197.

- [26] D. Lavayen-Farfan, M. J. L. Boada, and J. A. Rodriguez-Hernandez, "Bending collapse analysis for thin and medium-thin-walled square and rectangular hollow shapes," *Thin-Walled Structures*, vol. 165, 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.107934.
- [27] S. Poonaya, U. Teeboonma, and C. Thinvongpituk, "Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 6–7, 2009, doi: 10.1016/j.tws.2008.11.005.
- [28] S. Ekşi and K. Genel, "FE simulation of plastic collapse and geometrical factors affecting the bending response of a tubular aluminum beam," *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 59, no. 11–12, 2017, doi: 10.3139/120.111106.
- [29] A. K. Argyridi and E. J. Sapountzakis, "Higher order beam theory for linear local buckling analysis," *Eng Struct*, vol. 177, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.069.
- [30] A. O. Ayhan, K. Genel, and S. Ekşi, "Simulation of nonlinear bending behavior and geometric sensitivities for tubular beams with fixed supports," *Thin-Walled Structures*, vol. 51, 2012, doi: 10.1016/j.tws.2011.10.016.
- [31] D. Kecman, "Bending collapse of rectangular and square section tubes," *Int J Mech Sci*, vol. 25, no. 9–10, 1983, doi: 10.1016/0020-7403(83)90072-3.
- [32] S. Eksi and K. Genel, "Bending response of hybrid composite tubular beams," *Thin-Walled Structures*, vol. 73, 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.09.001.
- [33] N. Novak *et al.*, "Compression behaviour of TPMS-filled stainless steel tubes," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 852, 2022, doi: 10.1016/j.msea.2022.143680.
- [34] L. Blank and A. Frangi, "Design model for the bending resistance of fibre reinforced glulam," *Eng Struct*, vol. 211, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110385.
- [35] T. Li and L. Wang, "Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials," *Compos Struct*, vol. 175, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.05.001.
- [36] F. L. Palombini, J. E. de A. Mariath, and B. F. de Oliveira, "Bionic design of thin-walled structure based on the geometry of the vascular bundles of bamboo," *Thin-Walled Structures*, vol. 155, 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106936.
- [37] H. Yin, Y. Xiao, G. Wen, Q. Qing, and Y. Deng, "Multiobjective optimization for foam-filled multi-cell thin-walled structures under lateral impact," *Thin-Walled Structures*, vol. 94, 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.03.031.
- [38] H. Jiang, H. Ziegler, Z. Zhang, S. Atre, and Y. Chen, "Bending behavior of 3D printed mechanically robust tubular lattice metamaterials," *Addit Manuf*, vol. 50, p. 102565, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102565.
- [39] X. Ren, R. Das, P. Tran, T. D. Ngo, and Y. M. Xie, "Auxetic metamaterials and structures: A review," *Smart Materials and Structures*, vol. 27, no. 2. 2018. doi: 10.1088/1361-665X/aaa61c.

- [40] M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang, H. Lei, Y. Bai, and D. Fang, "Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies," *Int J Mech Sci*, vol. 159, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044.
- [41] J. Chen, W. Xu, Z. Wei, K. Wei, and X. Yang, "Stiffness characteristics for a series of lightweight mechanical metamaterials with programmable thermal expansion," *Int J Mech Sci*, vol. 202–203, 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106527.
- [42] M. F. Guo, H. Yang, and L. Ma, "3D lightweight double arrow-head plate-lattice auxetic structures with enhanced stiffness and energy absorption performance," *Compos Struct*, vol. 290, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115484.
- [43] E. Etemadi, M. Gholikord, M. Zeeshan, and H. Hu, "Improved mechanical characteristics of new auxetic structures based on stretch-dominated-mechanism deformation under compressive and tensile loadings," *Thin-Walled Structures*, vol. 184, 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110491.
- [44] C. Korner and Y. Liebold-Ribeiro, "A systematic approach to identify cellular auxetic materials," *Smart Mater Struct*, vol. 24, no. 2, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/2/025013.
- [45] L. Wei, X. Zhao, Q. Yu, W. Zhang, and G. Zhu, "In-plane compression behaviors of the auxetic star honeycomb: Experimental and numerical simulation," *Aerosp Sci Technol*, vol. 115, 2021, doi: 10.1016/j.ast.2021.106797.
- [46] M. Bodaghi, A. Serjouei, A. Zolfagharian, M. Fotouhi, H. Rahman, and D. Durand, "Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing," *Int J Mech Sci*, vol. 173, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105451.
- [47] X. Xin, L. Liu, Y. Liu, and J. Leng, "4D Printing Auxetic Metamaterials with Tunable, Programmable, and Reconfigurable Mechanical Properties," *Adv Funct Mater*, vol. 30, no. 43, 2020, doi: 10.1002/adfm.202004226.
- [48] R. Lakes, "Foam structures with a negative poisson's ratio," *Science (1979)*, vol. 235, no. 4792, 1987, doi: 10.1126/science.235.4792.1038.
- [49] J. J. Warner, A. R. Gillies, H. H. Hwang, H. Zhang, R. L. Lieber, and S. Chen, "3D-printed biomaterials with regional auxetic properties," *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 76, 2017, doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.05.016.
- [50] M. Shokri Rad, Y. Prawoto, and Z. Ahmad, "Analytical solution and finite element approach to the 3D re-entrant structures of auxetic materials," *Mechanics of Materials*, vol. 74, 2014, doi: 10.1016/j.mechmat.2014.03.012.
- [51] X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, and Z. D. Ma, "Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading," *Mater Des*, vol. 160, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.041.
- [52] N. Novak, L. Starčević, M. Vesenjak, and Z. Ren, "Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core," *Compos Struct*, vol. 210, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.050.

- [53] K. Essassi, J. luc Rebiere, A. El Mahi, M. A. Ben Souf, A. Bouguecha, and M. Haddar, "Experimental and analytical investigation of the bending behaviour of 3D-printed bio-based sandwich structures composites with auxetic core under cyclic fatigue tests," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 131, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105775.
- [54] M. Ruzzene and F. Scarpa, "Control of wave propagation in sandwich beams with auxetic core," in *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003. doi: 10.1177/1045389X03035515.
- [55] X. Zhao, L. Wei, D. Wen, G. Zhu, Q. Yu, and Z. D. Ma, "Bending response and energy absorption of sandwich beams with novel auxetic honeycomb core," *Eng Struct*, vol. 247, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113204.
- [56] H. Yazdani Sarvestani, A. H. Akbarzadeh, A. Mirbolghasemi, and K. Hermenean, "3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability," *Mater Des*, vol. 160, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.08.061.
- [57] H. G. Menon, S. Dutta, A. Krishnan, H. M. P., and B. Shankar, "Proposed auxetic cluster designs for lightweight structural beams with improved load bearing capacity," *Eng Struct*, vol. 260, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114241.
- [58] K. Meena and S. Singamneni, "A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects," *Mater Des*, vol. 173, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107779.
- [59] A. Alomarah, S. H. Masood, I. Sbarski, B. Faisal, Z. Gao, and D. Ruan, "Compressive properties of 3D printed auxetic structures: experimental and numerical studies," *Virtual Phys Prototyp*, vol. 15, no. 1, 2020, doi: 10.1080/17452759.2019.1644184.
- [60] N. K. Choudhry, B. Panda, and S. Kumar, "In-plane energy absorption characteristics of a modified re-entrant auxetic structure fabricated via 3D printing," *Compos B Eng*, vol. 228, 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109437.
- [61] R. P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, and T. Ngo, "Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications," *Eng Struct*, vol. 276, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115377.
- [62] C. Li, H. S. Shen, and H. Wang, "Full-scale finite element modeling and nonlinear bending analysis of sandwich plates with functionally graded auxetic 3D lattice core," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 23, no. 7, 2021, doi: 10.1177/1099636220924657.
- [63] K. Türkoğlu, H. Kasım, and M. Yazıcı, "Experimental investigation of 3D-printed auxetic core sandwich structures under quasi-static and dynamic compression and bending loads," *International Journal of Protective Structures*, vol. 14, no. 1, 2023, doi: 10.1177/20414196221079366.
- [64] S. Dutta, H. G. Menon, M. P. Hariprasad, A. Krishnan, and B. Shankar, "Study of auxetic beams under bending: A finite element approach," in *Materials Today: Proceedings*, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.479.

- [65] X. Jin, Z. Wang, J. Ning, G. Xiao, E. Liu, and X. Shu, "Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading," *Compos B Eng*, vol. 106, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.037.
- [66] C. Osuna-Sequera, D. F. Llana, G. Íñiguez-González, and F. Arriaga, "The influence of cross-section variation on bending stiffness assessment in existing timber structures," *Eng Struct*, vol. 204, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110082.
- [67] Y. Li, Z. Chen, D. Xiao, W. Wu, and D. Fang, "The Dynamic response of shallow sandwich arch with auxetic metallic honeycomb core under localized impulsive loading," *Int J Impact Eng*, vol. 137, 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103442.
- [68] R. Johnston and Z. Kazancı, "Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression," *Addit Manuf*, vol. 38, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101783.
- [69] M. B. Velásquez, L. Francesconi, and M. Taylor, "Design of low-porosity auxetic tessellations with reduced mechanical stress concentrations," *Extreme Mech Lett*, vol. 48, 2021, doi: 10.1016/j.eml.2021.101401.
- [70] J. P. Poirier, "Introduction to the physics of the Earth's interior," *Introduction to the physics of the Earth's interior*, 1991, doi: 10.1046/j.0956-540x.2000.01314.x.
- [71] G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes, and T. Rouxel, "Poisson's ratio and modern materials," *Nature Materials*, vol. 10, no. 11, 2011, doi: 10.1038/nmat3134.
- [72] K. E. Evans, M. A. Nkansah, I. J. Hutchinson, and S. C. Rogers, "Molecular network design [7]," *Nature*, vol. 353, no. 6340, 1991, doi: 10.1038/353124a0.
- [73] C. Huang and L. Chen, "Negative Poisson's Ratio in Modern Functional Materials," *Advanced Materials*, vol. 28, no. 37, 2016, doi: 10.1002/adma.201601363.
- [74] J. B. Choi and R. S. Lakes, "Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio," *J Mater Sci*, vol. 27, no. 17, 1992, doi: 10.1007/BF01166005.
- [75] I. I. Argatov, R. Guinovart-Díaz, and F. J. Sabina, "On local indentation and impact compliance of isotropic auxetic materials from the continuum mechanics viewpoint," *Int J Eng Sci*, vol. 54, 2012, doi: 10.1016/j.ijengsci.2012.01.010.
- [76] V. L. Coenen and K. L. Alderson, "Mechanisms of failure in the static indentation resistance of auxetic carbon fibre laminates," *Phys Status Solidi B Basic Res*, vol. 248, no. 1, 2011, doi: 10.1002/pssb.201083977.
- [77] G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, and P. V. S. Lee, "A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings," *Compos Struct*, vol. 135, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.038.
- [78] R. P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, and T. Ngo, "Novel lightweight high-energy absorbing auxetic structures guided by topology optimisation," *Int J Mech Sci*, vol. 211, 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106793.

- [79] N. Namvar, A. Zolfagharian, F. Vakili-Tahami, and M. Bodaghi, "Reversible energy absorption of elasto-plastic auxetic, hexagonal, and AuxHex structures fabricated by FDM 4D printing," *Smart Mater Struct*, vol. 31, no. 5, 2022, doi: 10.1088/1361-665X/ac6291.
- [80] J. Christensen, M. Kadic, O. Kraft, and M. Wegener, "Vibrant times for mechanical metamaterials," *MRS Communications*, vol. 5, no. 3, 2015. doi: 10.1557/mrc.2015.51.
- [81] Andy and K. Alderson, "Expanding materials and applications: Exploiting auxetic textiles," *Technical Textiles International*, vol. 14, no. 6, 2005.
- [82] C. E. Baker, "Auxetic Spinal Implants: Consideration of Negative Poisson's Ratio in the Design of an Artificial Intervertebral Disc," 2013.
- [83] Z. Wang and H. hu, "Auxetic materials and their potential applications in textiles," *Textile Research Journal*, vol. 84, no. 15, 2014, doi: 10.1177/0040517512449051.
- [84] Y. Liu and H. Hu, "A review on auxetic structures and polymeric materials," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 10, 2010.
- [85] H. Cao, A. Zulifqar, T. Hua, and H. Hu, "Bi-stretch auxetic woven fabrics based on foldable geometry," *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 13, 2019, doi: 10.1177/0040517518798646.
- [86] W. Wu *et al.*, "Mechanical properties of hierarchical anti-tetrachiral metastructures," *Extreme Mech Lett*, vol. 16, 2017, doi: 10.1016/j.eml.2017.08.004.
- [87] S. K. Bhullar, "Three decades of auxetic polymers: A review," *E-Polymers*, vol. 15, no. 4, 2015. doi: 10.1515/epoly-2014-0193.
- [88] U. Veerabagu, H. Palza, and F. Quero, "Review: Auxetic Polymer-Based Mechanical Metamaterials for Biomedical Applications," *ACS Biomaterials Science and Engineering*, vol. 8, no. 7, 2022. doi: 10.1021/acsbiomaterials.2c00109.
- [89] K. Zhang *et al.*, "Ultrahigh energy-dissipation and multifunctional auxetic polymeric foam inspired by balloon art," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 167, 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107435.
- [90] L. Jiang, B. Gu, and H. Hu, "Auxetic composite made with multilayer orthogonal structural reinforcement," *Compos Struct*, vol. 135, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.110.
- [91] N. Haque Faisal *et al.*, "Effect of fillers on compression loading performance of modified re-entrant honeycomb auxetic sandwich structures," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 58, no. 2, 2023, doi: 10.1177/03093247221083210.
- [92] H. Hu, "Auxetic Textile Materials - A review," *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, vol. 1, no. 1, 2017, doi: 10.15406/jteft.2017.01.00002.
- [93] S. Zhao, H. Hu, H. Kamrul, Y. Chang, and M. Zhang, "Development of auxetic warp knitted fabrics based on reentrant geometry," *Textile Research Journal*, vol. 90, no. 3–4, 2020, doi: 10.1177/0040517519866931.

- [94] D. Zheng, J. Zhang, B. Lu, and T. Zhang, "Energy absorption of fully clamped multi-cell square tubes under transverse loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 169, p. 108334, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.TWS.2021.108334.
- [95] W. Wu, L. Geng, Y. Niu, D. Qi, X. Cui, and D. Fang, "Compression twist deformation of novel tetrachiral architected cylindrical tube inspired by towel gourd tendrils," *Extreme Mech Lett*, vol. 20, 2018, doi: 10.1016/j.eml.2018.02.001.
- [96] D. P. Lavery, M. B. M. Thomas, P. Clark, and L. D. Addy, "The use of 3D metal printing (direct metal laser sintering) in removable prosthodontics," *Dent Update*, vol. 43, no. 9, 2016, doi: 10.12968/denu.2016.43.9.826.
- [97] J. Zhou *et al.*, "Flow boiling heat transfer coefficient and pressure drop in minichannels with artificial activation cavities by direct metal laser sintering," *Appl Therm Eng*, vol. 160, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113837.
- [98] N. Kumar Maurya *et al.*, "An overview of investigation of Fatigue, tensile strength and hardness of the components fabricated through direct metal laser sintering (DMLS) process," in *Materials Today: Proceedings*, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.131.
- [99] W. S. W. Harun, M. S. I. N. Kamariah, N. Muhamad, S. A. C. Ghani, F. Ahmad, and Z. Mohamed, "A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials," *Powder Technology*, vol. 327, 2018. doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.058.
- [100] S. Ranjan Pradhan, R. Singh, and S. Singh Banwait, "Comparison of DMLS and DMLS-waste assisted investment casting," *Mater Lett*, vol. 324, 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.132782.
- [101] B. Anush Raj, J. T. Winowlin Jappes, M. Adam Khan, V. Dillibabu, and N. C. Brintha, "Direct metal laser sintered (DMLS) process to develop Inconel 718 alloy for turbine engine components," *Optik (Stuttg)*, vol. 202, 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.163735.
- [102] Z. Dong, Y. Li, T. Zhao, W. Wu, D. Xiao, and J. Liang, "Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb," *Mater Des*, vol. 182, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108036.
- [103] G. Sun, X. Huo, D. Chen, and Q. Li, "Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression," *Mater Des*, vol. 133, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.07.057.
- [104] M. Fatih Kahraman and K. Genel, "Bending performance of the AuxOcta multi-cellular beam structure," *Eng Struct*, vol. 294, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116737.
- [105] D. Kecman, "Bending collapse of rectangular and square section tubes," *Int J Mech Sci*, vol. 25, no. 9–10, 1983, doi: 10.1016/0020-7403(83)90072-3.
- [106] S. Dutta, H. G. Menon, M. P. Hariprasad, A. Krishnan, and B. Shankar, "Study of auxetic beams under bending: A finite element approach," in *Materials Today: Proceedings*, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.479.

- [107] M. Fatih Kahraman and K. Genel, "Bending performance of the AuxOcta multi-cellular beam structure," *Eng Struct*, vol. 294, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116737.
- [108] K. Meena and S. Singamneni, "A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects," *Mater Des*, vol. 173, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107779.
- [109] R. C. Hibbeler, *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*, vol. 91, no. 5. 2016.
- [110] D. Bilston, D. Ruan, A. Candido, and Y. Durandet, "Parametric study of the cross-section shape of aluminium tubes in dynamic three-point bending," *Thin-Walled Structures*, vol. 136, 2019, doi: 10.1016/j.tws.2018.12.032.
- [111] Z. Huang and X. Zhang, "Three-point bending collapse of thin-walled rectangular beams," *Int J Mech Sci*, vol. 144, 2018, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.06.001.
- [112] Y. Sun and N. M. Pugno, "In plane stiffness of multifunctional hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio sub-structures," *Compos Struct*, vol. 106, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.05.008.
- [113] E. Magnucka-Blandzi and K. Magnucki, "Buckling and optimal design of cold-formed thin-walled beams: Review of selected problems," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 5, 2011, doi: 10.1016/j.tws.2010.09.011.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Fatih KAHRAMAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2015, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makina Mühendisliği A.B.D, Makine Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2013-2023 yılları arasında Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Fatih Kahraman, M., & Genel, K. (2023). Bending performance of the AuxOcta multi-cellular beam structure. *Engineering Structures*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116737>
- Kahraman, M. F., İriç, S., & Genel, K. (2024). Comparative failure behavior of metal honeycomb structures under bending: A finite element-based study. *Engineering Failure Analysis*, 107963. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107963>

DİĞER ESERLER: