



**ÖKSETİK TÜBÜLER YAPILARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Kemal SOLAK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

2023

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖKSETİK TÜBÜLER YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Kemal SOLAK

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

21 / 12 / 2023

Kemal SOLAK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖKSETİK TÜBÜLER YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kemal SOLAK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Bu çalışmada, tübüler öksetik yapıların mekanik özellikleri ve farklı alanlarda uygulanabilirliği üç farklı araştırma başlığı altında incelenmiştir. İlk bölümde, yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların direngenliğinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılardaki birim hücrenin belirli açılarla döndürülmesi ve hücrelere berkitici eklenmesinin yapının Poisson oranı ve direngenliği üzerindeki etkisi ANSYS/Static Structural yazılımında yapılan analizler ile incelenmiştir. Analizler sonucunda, dönme açısının artışıyla Poisson oranının azaldığı, direngenliğin ise arttığı görülürken, berkiticiler ise yapıların direngenliğini arttırmıştır. İkinci bölümde, dönen şekil değiştirme mekanizmalarına sahip eliptik, yer fıstığı ve kare boşluklu öksetik tübüler yapıların ezilme etkisindeki davranışları ve enerji emme kapasiteleri incelenmiştir. 304L paslanmaz çelikten üretilen numuneler üzerinde yapılan yarı-statik deneyler ve ANSYS/Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirilen analizler sonucunda eliptik boşluklarla oluşturulan tübüler yapıların en yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, berkiticilerin eklenmesi ile öksetik tübüler yapıların ezilme dayanıklılığının arttığı görülmüştür. Üçüncü bölümde ise inşaat mühendisliği alanında kullanılan beton dolgulu çelik kompozit kolonların öksetik tasarımlarının araştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, yer fıstığı şeklinde ve farklı Poisson oranları ile porozite değerlerine sahip tübüler öksetik yapılarla oluşturulan kompozit kolonların basınç etkisindeki mekanik özellikleri ANSYS/Static Structural yazılımının kullanıldığı sayısal analizler ile incelenmiş ve sonuçlar geleneksel bir kompozit kolonun davranışıyla karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, tübüler yapının porozitesinin azalmasının ve öksetik davranışının artmasının kolonun yük taşıma kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir.

2023, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: Öksetik Tübüler, Sonlu Elamanlar Metodu, Yarı-Statik Ezilme, Beton Dolgulu Öksetik Kolonlar, Negatif Poisson Oranı

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AUXETIC TUBULAR STRUCTURES

Kemal SOLAK

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Süleyman Nazif ORHAN

This thesis investigates various applications and mechanical properties of auxetic structures in three key areas. The first section addresses the limitations of high-porosity peanut-shaped auxetic structures in engineering applications. Two approaches, introducing stiffeners or rotating the unit cell, are proposed to enhance the stiffness of tubulars. Finite element simulations using ANSYS/Static Structural Module are used to evaluate Poisson's ratio and stiffness of auxetic tubulars. Stiffened models show higher Poisson's ratios and stiffness. Rotating the unit cell amplifies stiffness and decreases Poisson's ratio in peanut-shaped auxetics. The second section discusses the energy absorption capabilities of auxetic tubulars made from 304L stainless steel with rotating deformation mechanisms. It focuses on perforation shapes, including elliptic, peanut, square, and stiffeners. The role of perforation shape and stiffener in crash parameters is evaluated with quasi-static testing and non-linear numerical modeling using ANSYS/Ls-Dyna. Elliptic perforations demonstrate superiority in energy absorption, and stiffened auxetic models perform well in crash applications. The third section examines the intersection of auxetic materials with civil engineering applications, specifically concrete-filled steel columns. For this purpose, the mechanical properties of composite columns formed with peanut-shaped auxetic tubulars with different Poisson ratios and porosity are examined under compression by using ANSYS/Static Structural module, and the results are compared with the behavior of conventional column. Analysis reveals that reducing tubular structure porosity and enhancing auxetic behavior increases the column's load-carrying capacity.

2023, 80 page

Keywords: Auxetic Tubulars, Finite Element Method, Quasi-Static Crashworthiness, Concrete-Filled Auxetic Columns, Negative Poisson's Ratio

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü desteği sağlayan ve önerileriyle beni yönlendiren kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN'a derin minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Hayatım boyunca üzerimdeki en büyük emeğin sahibi olan anneme ve babama, her zaman desteklerini hissettiğim başta Arş. Gör. Kübra SOLAK olmak üzere kardeşlerime en içten teşekkürlerimi iletmek isterim. Onların desteği, akademik hedeflerin zorluklarıyla başa çıkabilmem için gerekli güç ve motivasyonu sağlamıştır.

Yüksek lisans öğrenimi sırasında BİDED-2210 Yurtiçi Lisansüstü Burs Programı kapsamında bursiyer olarak maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu tezin tamamlanmasına doğrudan ya da dolaylı katkıda bulunan herkese teşekkürlerimi iletmek isterim. Yüksek lisans tezim için ilham kaynağı olan ve samimi anlayışlarıyla destek olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Kemal SOLAK
Aralık 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Öksetik Malzemelerin Özellikleri ve Sınıflandırılması	3
1.2. Öksetik Yapıların Uygulama Alanları	7
1.3. Amaç ve Kapsam	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	20
3.1. Yer Fıstığı Boşluklu Öksetik Tübüler Yapıların Poisson Oranlarının ve Direngenliklerinin Belirlenmesi	20
3.1.1. Yer fıstığı boşluklu öksetik tübüler yapıların tasarımı.....	20
3.1.2. Sonlu elemanlar modeli.....	23
3.2. Öksetik Tübüler Yapıların Ezilme Davranışı.....	27
3.2.1. Malzeme özellikleri.....	27
3.2.2. Geometrik modelleme ve üretim.....	28
3.2.3. Basınç deney düzeneği.....	32
3.2.4. Ezilme performansı ölçütleri.....	33
3.2.5. Sonlu elemanlar modeli.....	34
3.2.6. Johnson-Cook malzeme modelinin uygulanması	35
3.3. Beton Dolgulu Öksetik Tübüler Kompozit Kolonların Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi.....	36
3.3.1. Kuşatılmış betonun malzeme özellikleri.....	36
3.3.2. Öksetik çelik tübüler yapıların ve kompozit kolonların tasarımı.....	39
3.3.3. Sonlu elemanlar modeli.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	45

4.1. Yer Fıstığı Boşluklu Öksetik Tübüler Yapıların Poisson Oranlarının ve Direngenliklerinin Belirlenmesi	45
4.2. Öksetik Tübüler Yapıların Ezilme Davranışı.....	50
4.3. Beton Dolgulu Öksetik Tübüler Kompozit Kolonların Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi.....	61
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	70
YAYINLAR	80



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
f'_{cc}	Kuşatılmış Betonun Basınç Dayanımı
f'_{co}	Kuşatılmamış Betonun Basınç Dayanımı
f'_{cu}	Artık Basınç Gerilmesi
f'_t	Beton Çekme Dayanımı
f_{ccb}	İki Eksenli Basınç Dayanımı
f_{rp}	Kuşatma Basıncı
f_y	Çelik Tübülerin Akma Dayanımı
R_L, R	Büyük Daire Yarıçapı
R_s, r	Küçük Daire Yarıçapı
$\dot{\epsilon}$	Plastik Birim Şekil Değiştirme Oranı
ϵ_{cc}	Kuşatılmamış Betonun Basınç Birim Şekil Değiştirmesi
ϵ_{cu}	Artık Basınç Birim Şekil Değiştirme
ϵ	Birim Şekil Değiştirme
θ	Dönme Açısı
σ	Gerilme
ν	Poisson Oranı
A	Johnson Cook Modeli Malzeme Akma Gerilmesi
B	Johnson Cook Modeli Pekleşme Modülü
C	Birim Şekil Değiştirme Hızı Katsayısı
d	Boşlukların Kısa Kenar Uzunluğu
$D, D\check{C}$	Tübüler Yapıların Dış Çapı
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
G	Kayma Modülü
H	Tübüler Yapıların Yüksekliği
k	Berkitici Kalınlığı
K	Hacim Modülü
L	Birim Hücre Kenar Uzunluğu
n	Pekleşme Üssü

s	Boşlukların Uzun Kenar Uzunluğu
T	Sıcaklık
t, w	Et Kalınlığı

Kısaltmalar

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing Materials
BDÖÇK	Beton Dolgulu Öksetik Çelik Kolon
CFE	Ezilme Kuvveti Verimliliği
cm	Santimetre
dk	Dakika
EA	Toplam Enerji Emilimi
GPa	Giga-Pascal
gr	Gram
J	Joule
kg	Kilogram
kN	Kilo-Newton
MCF	Ortalama Ezilme Kuvveti
mm	Milimetre
MPa	Mega-Pascal
N	Newton
SE	Sonlu Elemanlar
SEA	Özgül Enerji Emme
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Deformasyon mekanizmaları: (a) konvansiyonel malzeme, (b) öksetik malzeme.....	2
Şekil 1.2. Düzlem dışı eğilme deformasyon modelleri: (a) geleneksel eyer formu, (b) öksetik kubbe formu.	4
Şekil 1.3. Çarpma davranışı: (a) konvansiyonel malzemeler, (b) öksetik malzemeler.....	4
Şekil 1.4. Öksetik malzemelerin sınıflandırılması.	6
Şekil 3.1. Yer fıstığı boşluklu tübülerlerin tasarım aşamaları: (a) geleneksel ve berkiticili birim hücreler, (b) kare şeklinde düzenlenmiş düzlemsel plakalar, (c) öksetik tübüler modeller.....	22
Şekil 3.2. Solid285 ağ elemanı (Anonymous 2013).	24
Şekil 3.3. Çizgi yer değiştirmesinin şematik gösterimi.	24
Şekil 3.4. Ağ yakınsama çalışmasının sonuçları.....	25
Şekil 3.5. SEY analizlerinde kullanılan sınır koşulları ve ağ elemanı detayı.	27
Şekil 3.6. (a) Çekme numunelerinin geometrik boyutları (mm), (b) çekme testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	28
Şekil 3.7. Basınç altında benzer deformasyon mekanizmasına sahip birim hücrelerin detayları (önden ve yandan görünüm): (a) geleneksel eliptik, (b) berkiticili eliptik, (c) geleneksel yer fıstığı, (d) berkiticili yer fıstığı, (e) geleneksel kare, (f) berkiticili kare.....	30
Şekil 3.8. Ezilme davranışı incelenen öksetik tübüler yapılar: (a) geleneksel öksetik yapılar, (b) berkiticili öksetik yapılar.	31
Şekil 3.9. Basma deneyi düzeneği.	32
Şekil 3.10. SE modelinin sınır şartları ve ağ elemanı gösterimi.	35
Şekil 3.11. Johnson-Cook modeli eğri uydurması.	36
Şekil 3.12. Mander'in gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	37
Şekil 3.13. Yer fıstığı şeklindeki öksetik birim hücre.	39
Şekil 3.14. Çalışma kapsamında incelenen kompozit kolonlar.	41
Şekil 3.15. Gerçekleme çalışmasından ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri.....	42
Şekil 3.16. Solid185 ağ elemanı (Anonymous 2013).	43
Şekil 3.17. Kompozit kolonların sonlu elemanlar modelinin ağ yapısı.	43

Şekil 3.18. Kompozit kolonların analizinde kullanılan sınır şartları.	44
Şekil 4.1. Tübüler öksetik yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.	47
Şekil 4.2. Öksetik yapıların Poisson oranı ve direngenlik değerlerinin birim hücrenin dönüş açısıyla değişimi.	47
Şekil 4.3. Öksetik tübüler yapılardaki von Mises gerilme dağılımları ve bu yapıların deformasyon modları.	49
Şekil 4.4. Yer fıstığı şeklindeki birim hücrelerin 5 mm basınç altındaki deformasyon modları.	49
Şekil 4.5. Döndürülmemiş geleneksel ve berkiticili modellerin anlık deformasyon görüntüleri ile kuvvet-yer değiştirme eğrileri.	50
Şekil 4.6. Eliptik boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GE, (b) BE.	51
Şekil 4.7. Yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GF, (b) BF.	52
Şekil 4.8. Kare boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GK, (b) BK.	53
Şekil 4.9. Eliptik boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GE, (b) BE.	54
Şekil 4.10. Yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GF, (b) BF.	55
Şekil 4.11. Kare boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GK, (b) BK.	56
Şekil 4.12. Öksetik tübüler yapıların performans değerlendirme parametrelerinin karşılaştırılması: (a) EA, (b) SEA, (c) Pmax, (d) CFE.	60
Şekil 4.13. A1C, A2C, A3C ve GKK modellerin yük-yer değiştirme eğrileri.	63
Şekil 4.14. B1C, B2C, B3C ve GKK yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	64
Şekil 4.15. Kompozit kolonlardaki tübüler yapılarda oluşan von Mises gerilme dağılımları.	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Öksetik malzemelerin mevcut uygulama alanları (Prawoto 2012).....	9
Çizelge 3.1. Birim hücrelerin geometrik parametreleri ve tübülerlerin genel boyutları.	23
Çizelge 3.2. Çizgi yer değiştirmelerinin karşılaştırılması.....	26
Çizelge 3.3. 304L paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri.	28
Çizelge 3.5. Üretilen numunelerin kısaltmaları.	32
Çizelge 3.6. Johnson-Cook modeli malzeme parametreleri.	36
Çizelge 3.7. Kuşatılmış betonun malzeme özellikleri.	39
Çizelge 3.8. Öksetik tübüler yapılarda kullanılan birim hücrelerin boyutları.	40
Çizelge 3.9. Çeliğin izotropik malzeme özellikleri.	41
Çizelge 4.1. Tübüler yapıların analizlerden elde edilen Poisson oranları ve direngenlik değerleri.	46
Çizelge 4.2. Öksetik tübüler yapılarının performans değerlendirme parametre sonuçları.....	59
Çizelge 4.3. Öksetik tübüler yapılardaki birim hücre uzunluğu ile bu yapıların porozite, Poisson oranı ve direngenlik değerleri.....	62
Çizelge 4.4. Kompozit kolonlarda kullanılan öksetik yapıların Poisson oranı ve direngenlik değerleri.	64
Çizelge 4.5. Kompozit kolonlarda oluşan von Mises gerilme değerleri.....	65

1. GİRİŞ

Poisson oranı malzemelerin karakteristik özelliklerinden biridir ve deformasyon etkisinde, deformasyona dik doğrultuda oluşan gerinin deformasyon doğrultusundaki gerinime oranlanmasıyla hesaplanır. Poisson oranı ismini, bu terimi ilk olarak 19. yüzyılın başlarında ortaya koyan Fransız bilim adamı Siméon Poisson'dan almıştır (Arago 1854). Poisson oranının (ν) hesaplanmasında kullanılan ve aşağıda verilen formül, çekme veya basınç etkisinde bir cisimde enine gerinin boyuna gerinime negatif oranı olarak ifade edilebilir.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{enine}}{\varepsilon_{boyuna}} \quad (1.1)$$

Poisson oranı, konvansiyonel malzemelerin pozitif bir değere sahip olmasını sağlamak için önünde bir eksi işaretiyle ifade edilir. İzotropik özelliklere sahip malzemelerde Elastisite modülü (E), kayma modülü (G) ve hacim modülü (K), Poisson oranı kadar önemlidir ve Poisson oranı, kayma ve hacim modülleri kullanılarak da tanımlanabilmektedir (Poirier 2000). Söz konusu modüller arasındaki ilişki aşağıdaki verilmiştir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1.3)$$

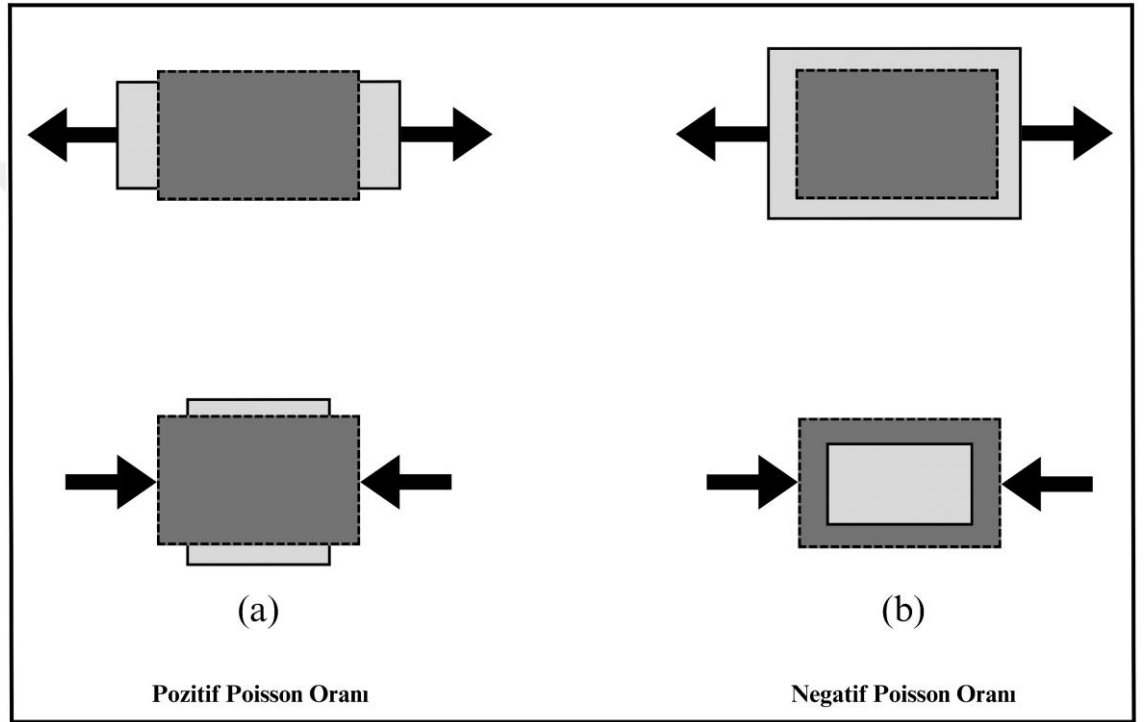
Bu iki eşitlikten yola çıkılarak Poisson oranı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilmektedir.

$$\nu = \left(\frac{3K-2G}{6K+2G} \right) \quad (1.4)$$

Yukarıda verilen bağıntılar Poisson oranının değerini -1 ile 0,5 arasında sınırlandırmaktadır (Fung 1965). Poisson oranının pozitif değeri, Şekil 1.1 (a)'da gösterildiği gibi, malzemenin gerilme sonrasında yanal genişmesini ifade etmektedir.

1. GİRİŞ

Ayrıca Poisson oranının 0,5 olması malzemenin sıkıştırılmaz olduğunu göstergesidir. Bununla birlikte, pozitif Poisson oranına sahip olan konvansiyonel malzemelerin davranışının tam tersine özellikler gösteren malzemeler de mevcuttur. Bu malzemeler Şekil 1.1 (b)'de gösterildiği gibi çekme kuvvetlerine maruz kaldıklarında enine genişleme sergilerken, sıkıştırıldığında enine yönde daralma eğilimi göstermektedirler. Bu tür davranışı sergileyen malzemeler negatif Poisson oranına sahiptirler ve “öksetik” olarak adlandırılırlar (Evans and Alderson 2000).



Şekil 1.1. Deformasyon mekanizmaları: (a) konvansiyonel malzeme, (b) öksetik malzeme.

1980’li ve 1990’lı yıllarda araştırmacılar tarafından biyolojik dokuları (Veronda and Westmann 1970; Williams and Lewis 1982) ve köpükleri (Lakes 1987) kapsayan negatif Poisson oranına sahip malzemelere ilişkin araştırmalar yürütülmüştür. Bununla birlikte, bu malzemelerin öksetik olarak adlandırılması bu çalışmalardan birkaç yıl sonra olmuştur. Öksetik terimi, “artış eğilimi” anlamına gelen Yunanca kökenli “auxetikos” sözcüğünden türetilmiştir. 1991 yılında yapılan bir araştırmanın bulgularından sonra, “Poisson oranı negatif olan malzeme” şeklindeki uzun ifadeden kaçınmak amacıyla öksetik terimi getirilmiş ve kısaltma olarak kullanılmıştır (Evans et al. 1991).

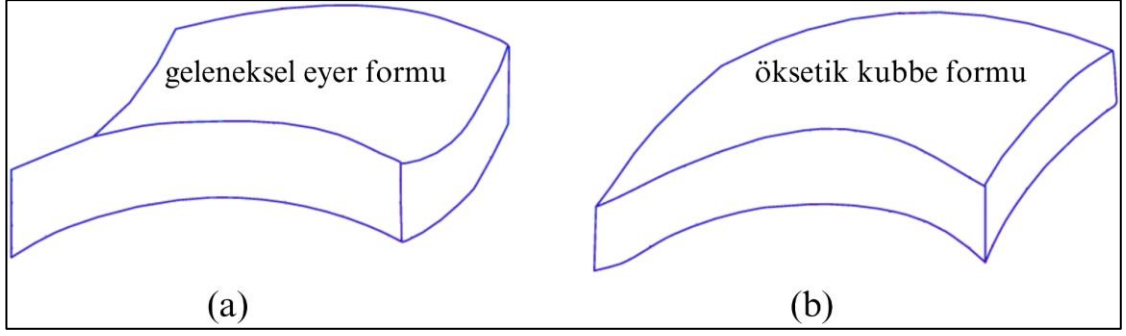
Öksetik malzemelerin, konvansiyonel malzemelere kıyasla daha iyi ses emilimi (Scarpa et al. 2004), kesme dayanımı (Choi and Lakes 1992), senklastik davranış (McCaw and Cuan-Urquizo 2018), değişken geçirgenlik (Alderson et al. 2000) ve darbe/enerji emme performansı (Jiang ve Hu 2017a) sergiledikleri belirlenmiştir. Sahip oldukları bu özgün davranışlar sayesinde öksetik yapılar, havacılık uygulamaları (Lira et al. 2011), biyomedikal malzemeler (Wu et al. 2018), askeri ürünler (Wang, Y et al. 2018), spor malzemeleri (Duncan et al. 2018) ve tekstil (Wang and Hu 2014) alanlarında yaygın bir kullanıma sahip olmuşlardır.

1.1. Öksetik Malzemelerin Özellikleri ve Sınıflandırılması

Öksetik malzemeler, konvansiyonel malzemelerde görülmeyen benzersiz mekanik özelliklere sahiptirler ve bu özellikleri sayesinde çok farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar (Orhan and Erden 2022a). Öksetik malzemelerin bu sıra dışı özellikleri bu bölümde özetlenmiştir.

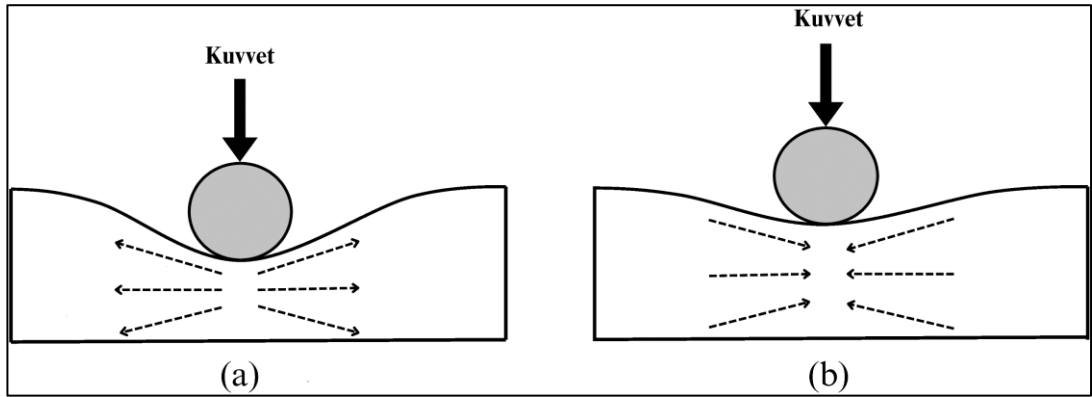
Öksetik malzemeler, konvansiyonel malzemelerle karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerine karşı daha fazla direnç göstermektedirler (Scarpa and Tomlin 2000). Klasik Elastisite teorisine göre izotropik malzemelerin elastik özellikleri, yukarıda verilen Denklem 1.2 aracılığıyla tanımlanabilmektedir. Bu denklem incelendiğinde, Poisson oranındaki bir azalmanın, kayma modülünün (G) değerinde bir artışa yol açacağı açık olarak görülmektedir.

Konvansiyonel malzemeler düzlem dışı eğilme momentine maruz kaldıklarında, Şekil 1.2 (a)'da gösterildiği gibi eyer şeklinde bir deformasyon gösterirler. Buna karşılık, öksetik yapılar, Şekil 1.2 (b)'de gösterildiği gibi, “eş eğrilik” (senklastik) olarak adlandırılan bir davranış olan kubbe şeklinde bir eğrilik sergilerler. Bu benzersiz özellik, çeşitli uygulamalarda kullanılan kubbeli yüzeylerin etkili bir şekilde kavranmasını sağlamaktadır (Alderson et al. 2010a).



Şekil 1.2. Düzlem dışı eğilme deformasyon modelleri: (a) geleneksel eyer formu, (b) öksetik kubbe formu.

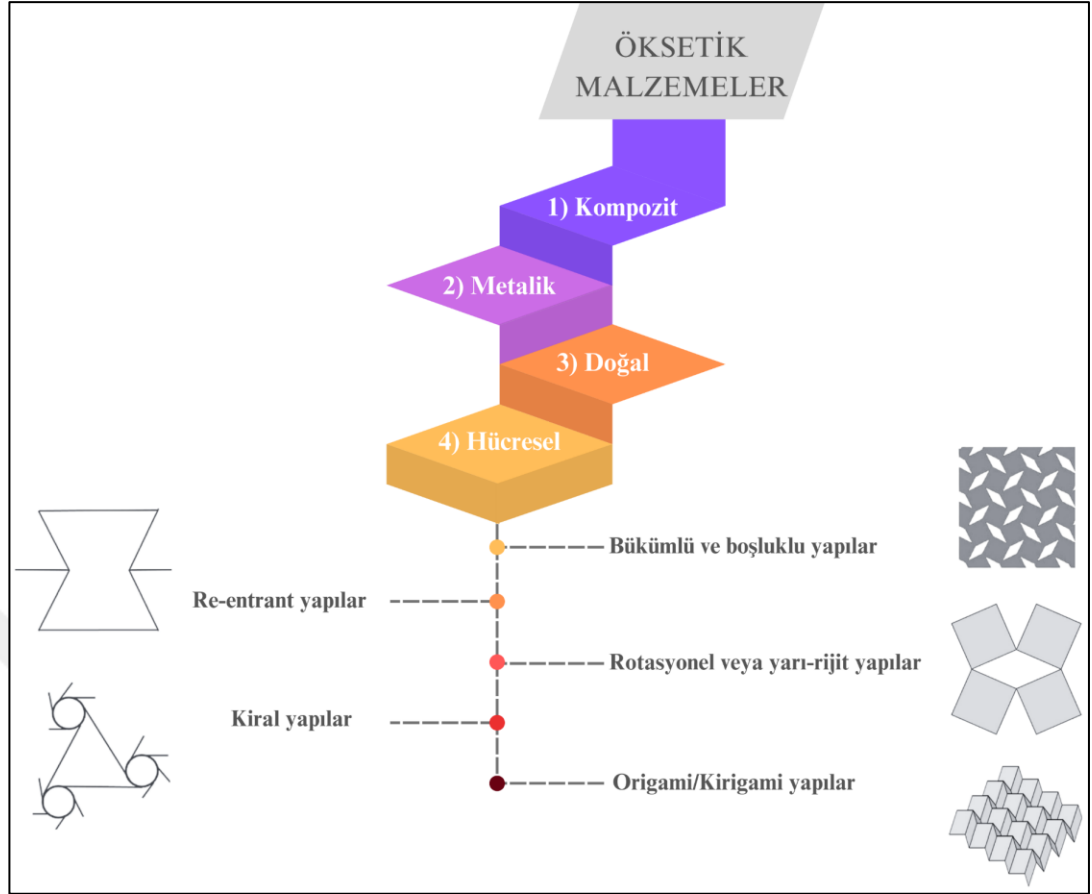
Öksetik malzemeler kayda değer bir enerji emilimi özelliğine sahiptirler. Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu malzemelerin konvansiyonel malzemelere kıyasla daha fazla enerji emilimi ve daha yüksek darbe direnci sergilediğini açıkça ortaya koymuştur (Chen and Pugno 2012; Yang et al. 2013). Öksetik malzemelerin faydalı bir şekilde kullanılması için enerji emme davranışından sorumlu olan temel mekanizmaların anlaşılması önemlidir. Bu malzemelerin enerji emme davranışı, mikroyapısal özellikleriyle yakından ilişkilidir ve malzemenin deformasyon sırasındaki enerjiyi dağıtma yeteneği mikroskobik düzeyde, bileşenlerin benzersiz düzenine ve etkileşimlerine atfedilmektedir. Bu yapılarda gözlemlenen mikroyapısal davranış, öksetiklerin diğer bir özelliği olan çentik direnci ile de açıklanabilmektedir. Konvansiyonel malzemelerde, uygulanan kuvvete dik doğrultuda genleşme meydana gelmektedir. Buna karşılık, öksetik malzemelerde ise Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, kuvvet uygulama noktasında yerel büzülmeler oluşmakta ve böylece yoğunluk ve direnç artmaktadır. Öksetik yapıların performansındaki bu artış, enerji emme yeteneğinin de artmasına yol açmaktadır (Saxena et al. 2016).



Şekil 1.3. Çarpma davranışı: (a) konvansiyonel malzemeler, (b) öksetik malzemeler

Öksetik yapılar, gözenekli yapılarından dolayı değişken bir geçirgenlik özelliğine de sahiptirler (Alderson et al. 2001). Tipik olarak çoğu malzeme deformasyondan bağımsız olarak sabit bir geçirgenlik sergilemektedir. Bununla birlikte, öksetik malzemeler çeşitli geçirgenlik modelleri göstererek bu geleneksel davranıştan sapmaktadırlar. Öksetik malzemeler çekme kuvvetlerine maruz kaldığında, içyapıları genişleterek gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır. Bu genişleme, malzeme içinde önceden tıkanmış veya daralmış yolların açılmasına neden olmakta ve böylece sıvı veya gaz akışı kolaylaşmaktadır. Nihai olarak, öksetik malzemenin deformasyonu geçirgenliğinde bir artışa neden olur ve böylece maddelerin yapı boyunca daha verimli bir şekilde difüzyonu veya taşınması sağlanır. Bu durumun tersine, öksetik malzemelerin içyapısı, sıkışmaya maruz kaldığında büzülme ve bunun sonucunda gözeneklilikte bir azalma meydana gelmektedir. Bu olay, geçiş kanallarının kapanmasına yol açarak sıvı veya gaz akışının kısıtlanmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, öksetik malzemelerin sıkıştırılması geçirgenliğin azalmasına neden olur ve maddelerin difüzyonu veya taşınması engellenir (Attard et al. 2018). Öksetik malzemeler, çeşitli alanlarda uygulanan filtrelerin yapılmasında, sergiledikleri bu değişken geçirgenlik nedeniyle tercih edilmektedir (Alderson et al. 2007).

Öksetik malzemelerin sınıflandırılması ise en genel haliyle doğal öksetikler ve yapay öksetikler şeklinde yapılmaktadır (Orhan and Erden 2022b). Bu sınıflandırma Şekil 1.4'te gösterildiği gibi daha da genişletilerek öksetikler, doğal, hücreli, metalik ve kompozit öksetikler olmak üzere dört farklı kategoriye ayrılabilirler (Kelkar et al. 2020). Günümüzde yapılan araştırmaların temelini oluşturan öksetikler ise hücreli yapılardır. Hücreli öksetikler ile ilgili genel özellikler aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 1.4. Öksetik malzemelerin sınıflandırılması

Re-entrant şekilli hücresel öksetik yapılar ilk olarak Gibson et al. (1982) tarafından yapılan çalışmayla ortaya konmuştur ve yaygın bir şekilde literatür çalışmalarında yer almıştır. Bu çalışmalara örnek olarak Masters and Evans (1996), re-entrant yapının iki boyutlu analizini içeren bir inceleme sunmuştur. Chen and Fu (2017) ise geleneksel 3 boyutlu re-entrant bal peteğini modifiye ederek yeni bir yapıyı tasarlayarak incelemişlerdir. Rad et al. (2019) tarafından yapılan çalışma sonucunda ise re-entrant öksetiklerin darbe dayanımı ve enerji yutma kapasitesi açısından konvansiyonel malzemelere kıyasla daha iyi performans sergilediği ve darbe yüklerine karşı üstün dayanım gösterdiği belirtilmiştir.

Kiral şeklindeki öksetikler, ilk olarak Kelvin (1894) tarafından yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Bu yapılar, teğetsel olarak bağlanan bağlarla çevrelenen merkezi bir silindirden oluşmaktadırlar. Rijit bağların maruz kaldığı mekanik yüklerin bir sonucu olarak, kiral yapılar öksetik davranış göstermektedirler (Prall and Lakes 1997; Spadoni and Ruzzene 2012). Merkezi silindirlerin teğetsel bağlara göre yerleşimine ve her bir

merkezi silindirde mevcut olan bağların sayısına bağlı olarak, altılı-kiral, üçlü-kiral, ters-üçlü-kiral, dörtlü-kiral ve ters-dörtlü-kiral isminde beş farklı kiral öksetik yapı tipi vardır (Grima et al. 2008; Alderson et al. 2010b).

Bükümlü öksetik levhalar, düz malzemelere kontrollü deformasyon uygulanarak üretilir ve bu da çok sayıda büküm ve kıvrıma sahip üç boyutlu bir yapının oluşmasına yol açar. Bükümlü yapıların tasarımı Japon kâğıt katlama sanatı Kirigami ve Origami'den yola çıkılarak yapılmıştır. Bu durum daha sonra, adı geçen kâğıt sanatlarının öksetik malzemeler içeren çalışmalara entegre edilmesine yol açmış ve böylece yeni bir öksetik malzeme kategorisinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Boşluklu öksetikler ise yapıları boyunca düzenli olarak dağıtılmış küçük veya büyük boşluklara sahip öksetik malzemelerdir. Bu boşlukların eklenmesi malzemeye ek mekanik özellikler kazandırarak potansiyel uygulama yelpazesini genişletmektedir. Ayrıca, bu boşluklar hem yapının ağırlığını azaltmakta hem de esnekliğini ve akustik özelliklerini de geliştirmektedir (Wang, Z et al. 2020).

Diğer bir öksetik yapı türü ise rotasyonel veya yarı-rijit öksetiklerdir. Bu yapılar karmaşık bir geometrik düzene sahiptirler ve bu sayede öksetik davranış göstermektedirler. Genellikle tekrar eden birim hücrelerden veya belirli yollarla bağlanan parçalardan meydana gelirler ve daha büyük bir model oluştururlar. Bu geometrik form, gerilme veya gerinimin yapı boyunca ve yapı öksetik davranış gösterecek şekilde dağılmasına imkân vermektedir (Grima and Evans 2000). Bu yapılara örnek olarak dönen kareler (Li et al. 2002), dönen dikdörtgenler (Grima et al. 2005) ve dönen üçgenler (Chetcuti et al. 2014) gösterilebilir.

1.2. Öksetik Yapıların Uygulama Alanları

Negatif Poisson oranına sahip malzemelerin kullanımı, ileri üretim tekniklerinin gelişmesi ile birlikte hızlı bir ivme kazanmıştır. Öksetik yapıların literatürde sıklıkla karşılaşılan uygulama alanları aşağıda açıklanmıştır.

Biyomedikal alanında kullanılan öksetik malzemeler çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Stentler, anüloplasti halkaları ve implantlar bu uygulamalara örnek olarak

verilebilir. Öksetik stentler kan damarına yerleştirildiğinde genişleme özelliğine sahiptirler ve bu durum, stentlerin yerleştirmesini kolaylaştırmakta ve komplikasyon olasılığını azaltmaktadır (Amin et al. 2015). Ayrıca, konvansiyonel bandajlara kıyasla daha üstün uyum sağlayan ve iyileşme sürecini artıran uyarlanabilir bandajlar oluşturmak için yara pansumanlarının üretiminde de öksetik malzemeler kullanılmaktadır (Pruksawan et al. 2022)

Biyomedikal uygulamaların yanında, eldiven ve kask gibi spor ekipmanlarında da öksetik malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Öksetik yapılar sayesinde bu malzemelerin vücuda uyumu artmakta ve böylece sporculara daha iyi kavrama desteği sağlayarak sporcuları dış kuvvetlere karşı daha iyi korumaktadırlar. Öksetik malzemelerin yüksek enerji emme yeteneği, bu bağlamda etkinliklerine katkıda bulunan önemli bir faktördür (Foster et al. 2018; Faraci et al. 2021).

Öksetik malzemeler, kumaşların tasarımını ve işlevselliğini temelden değiştirerek tekstil endüstrisinde de önemli ilerlemeler kaydedilmesini sağlamıştır. Bu yapıların kumaşlara dahil edilmesi, kumaşların çeşitli yönlerde olağanüstü esneyebilirlik sergilemesine imkân vermiş ve bu da konfor ve hareket özgürlüğünü önemli ölçüde arttırmıştır. Bu tür malzemelerin kullanımının, elastikiyet ve dayanıklılığın çok önemli olduğu spor giyim, kompresyon giysileri ve esnek giysilerin geliştirilmesinde özellikle avantajlı olduğu kanıtlanmıştır (Miller et al. 2009; Glazzard and Breedona 2014).

Yukarıda belirtilen uygulamalara ek olarak öksetik yapıların uygulama alanları daha da genişletilebilir. Yeni üretim tekniklerinin ortaya çıkması ve mevcut tekniklerdeki ilerlemeler ile bu yapıların uygulanabilirliği giderek artmaktadır. Çizelge 1.1’de öksetik yapıların literatürde yer alan kapsamlı uygulama alanları verilmiştir.

Çizelge 1.1. Öksetik malzemelerin mevcut uygulama alanları (Prawoto 2012)

Alan	Uygulamalar
Havacılık ve uzay	Motor kanatları, termal koruma, uçak burun konileri, kanat paneli, titreşim emici
Otomotiv	Tampon, ses ve titreşim emici parçalar, bağlantı elemanları
Biyomedikal	Bandaj, yara baskı pedi, yapay kan damarı, cerrahi implantlar
Askeri	Kask, kurşun geçirmez yelek, dizlik, eldiven, koruyucu ekipman
Sensörler/aktüatörler	Hidrofon, piezoelektrik cihazlar, çeşitli sensörler
Tekstil	Elyaflar, fonksiyonel kumaşlar, renk değiştiren kumaşlar, iplikler

1.3. Amaç ve Kapsam

Konvansiyonel malzemeler pratik uygulamalarda önemli bir rol oynamaya devam ederken, bu malzemelerin sağlayamadığı gereksinimleri karşılamak için sürekli olarak yeni malzemeler geliştirilmekte ve pazara sunulmaktadır. Bu doğrultuda mekanik meta-malzemeler oluşturulurken temel parametreler, malzemenin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi ve ayarlanmasıdır (Zheng et al. 2014; Frenzel et al. 2017; Barchiesi et al. 2019). Literatürde çeşitli meta-malzeme türleri yer almakla birlikte, araştırmaların önemli bir kısmı öksetik malzemeler üzerine gerçekleştirilmiştir. Öksetik malzemeler, negatif Poisson oranına sahip olma gibi benzersiz bir özelliğe sahiptir ve bu özellik onlara enerji Emilimi, kayma direnci ve senklastik davranış açısından geleneksel malzemelere göre belirgin avantajlar sağlamaktadır. Son yıllarda modern imalat tekniklerindeki gelişmeler sayesinde çok çeşitli öksetik malzeme ve yapılar tasarlanmış ve üretilerek incelenmiştir (Mir et al. 2014; Saxena et al. 2016; Jiang and Li 2018). Önceki çalışmalarda sıklıkla incelenen re-entrant ve yıldız şekilli öksetikler gibi keskin köşelere sahip yapılarda, birim hücrenin sünekliğini olumsuz etkileyen gerilme yığılmaları görülmüştür. Bu bağlamda eliptik ve yer fıstığı gibi yumuşak köşelere sahip geometrik formların, özellikle büyük deformasyona maruz kalan öksetik yapılar için daha iyi seçenekler olduğu belirtilmektedir (Wang et al. 2017; Meena and Singamneni 2019; Zhu et al. 2023). Üç boyutlu yapılar arasında yer alan tübüler yapılar ise silindirik ezilme kutuları, çiviler, vasküler iskeleler ve stentler gibi çeşitli uygulama alanlarına uygunluklarından dolayı büyük ilgi görmektedirler. Ayrıca, genel olarak enerji-emici yapılar, havacılık, spor malzemeleri ve otomotiv endüstrisi de dahil olmak üzere çok sayıda sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Duncan et al. 2016; Allen et al. 2017). Bu nedenlerle araştırmacılar sürekli olarak yenilikçi yapısal tasarımlar ortaya

koymaktadırlar. Bu konfigürasyonlar, azaltılmış tepe kuvvetleri ve arttırılmış özgül enerji emilimi ile karakterize edilmektedir. Bahsi geçen endüstrilerde, gelişmiş güvenlik özelliklerine sahip ve ezilme etkilerine dayanıklı yapılara duyulan istek, devam eden teknolojik ilerlemeler için önemli bir motivasyon kaynağı olmuştur ve enerji emici yapıların ezilme dayanıklılığını artırmak için önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu yapılar genel olarak, kinetik enerji ile birlikte darbeyi yumuşatan kontrollü bir deformasyon bölgesi sağlamak üzere tasarlanmaktadır. Çeşitli alanlarda kullanılan ezilmeye dayanıklı yapılarda, farklı malzeme ve şekillerden yapılmış tübüler yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapılardaki enerji emiliminin etkinliği tübüler yapının geometrisi ve malzeme özellikleri ile birlikte ezilme hızı, sınır koşulları ve yükleme koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Palanivelu et al. 2010; Baroutaji et al. 2017; El-baky et al. 2023). Tübüler yapıların kullanıldığı bir diğer alanda modern yapı endüstrisidir. Bu alanda, konvansiyonel yapıların özelliklerini iyileştirmeyi ve yeni kompozitlerin geliştirilmesini amaçlayan yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu kompozit yapılar arasında beton dolgulu çelik kompozit kolonlar sıklıkla karşılaşılan elemanlar olarak öne çıkmakta ve inşaat mühendisliğinde kullanımının avantajlarını vurgulanmaktadır (Horváth et al. 2022). İnşaat mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan bu kompozit kolonlarda, betonu kuşatan tübüler formdaki dış çelik parçanın öksetik davranış gösterecek bir geometride tasarlanması ve bu durumun kolonun davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi yeni ve yükselen bir trend olarak literatürde yer bulmaktadır (Alderson et al. 2005; Luo et al. 2022).

Bu tez kapsamında, tübüler öksetik yapıların mekanik özellikleri ve farklı alanlarda uygulanabilirliği üç farklı araştırma başlığı altında incelenmiştir. İlk bölümde, yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların direngenliğinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılardaki hücrelerin belirli açılarla döndürülmesi ve hücrelere berkitici eklenmesinin yapının Poisson oranı ve direngenliği üzerindeki etkisi ANSYS/Static Structural yazılımında yapılan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizleri ile incelenmiştir. İkinci bölümde, dönen şekil değiştirme mekanizmalarına sahip eliptik, yer fıstığı ve kare boşluklu öksetik tübüler yapıların ezilme etkisindeki davranışları ve enerji emme kapasiteleri araştırılmıştır. Bu yapılar, 304L paslanmaz çelikten üretilen numuneler üzerinde yapılan yarı-statik deneyler ve ANSYS/Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirilen analizlerle incelenmiştir. Üçüncü bölümde ise, inşaat mühendisliği

1. GİRİŞ

alanında kullanılan beton dolgulu çelik kompozit kolonların öksetik tasarımlarının araştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, yer fıstığı şeklinde ve farklı Poisson oranları ile porozite değerlerine sahip tübüler öksetik yapılarla oluşturulan kompozit kolonların basınç etkisindeki mekanik özellikleri ANSYS/Static Structural yazılımının kullanıldığı SEY analizleri ile incelenmiş ve sonuçlar geleneksel kompozit kolonların davranışıyla karşılaştırılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Huang et al. (2002), eş merkezli yüklere maruz kalan beton dolgulu çelik tübüler kolonların deneysel incelemesine odaklanmıştır. Kare kolonların nihai mukavemetini ve sünekliğini iyileştirmek için berkitici kullanmışlardır. Çalışma kapsamında kolonun kesit şekli, genişlik-kalınlık oranı ve berkitici düzeni parametrik olarak çalışılmıştır. Ayrıca, kesit şeklinin ve berkitici takviyelerin eksenel gerilme dağılımı üzerindeki etkilerini incelemek için doğrusal olmayan SEY analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak, önerilen berkiticinin kare kolonların nihai mukavemetini ve sünekliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Giakoumelis and Lam (2004), basınç yüküne maruz kalan yüksek dayanımlı beton dolgulu dairesel kısa kolonların kapsamlı bir incelemesini yapmışlardır. Araştırmalarında, çelik tübüler yapının kalınlığı, ara yüzeydeki aderans ve beton çekirdeğin maruz kaldığı kuşatma etkisi gibi temel parametreleri incelemişlerdir. Çalışma, deneysel sonuçların çeşitli mevcut yapısal kodlarla detaylı bir şekilde karşılaştırılmasını içermektedir. Çalışma sonucunda bu tür yapısal konfigürasyonlarda kuşatılmış betonu değerlendirmek için yeni bir katsayı önerilmiştir.

Yu et al. (2008), kendiliğinden yerleşen betonla doldurulmuş içi boş yapısal çelik kolonların performansını değerlendirmek için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bu deneyler sonucunda, yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonla doldurulmuş içi boş yapısal çelik kolonların sünekliğinin, özellikle eksenel yükler altında normal dayanımlı muadillerine göre daha düşük olduğu kanıtlanmış ve sismik bölgelerde dikkatli olunması gerektiği vurgulanmıştır. Literatürdeki yapısal kodlardan elde edilen kesit kapasitesi tahminlerinin karşılaştırmalı değerlendirmeleri, bazı kodların kare kesitli kolonların kapasitelerini biraz fazla tahmin etme eğiliminde olmasına rağmen genel olarak güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Nia and Hamedani (2010), farklı kesit geometrilerine sahip ince cidarlı tübüler yapıların deformasyonlarını ve enerji emme kapasitelerini araştırmıştır. İncelenen kesitler arasında dairesel, kare, konik, altıgen, üçgen, piramidal ve dikdörtgen şekilliler yer almaktadır. Deneysel ve sayısal incelemeler, eksenel yarı-statik yükleme hali göz önüne

alınarak yapılmıştır. Araştırma sırasında ince cidarlı tübüler yapıların aynı hacim, yükseklik, ortalama kesit alanı, kalınlık ve malzeme özelliklerine sahip olmasına dikkat edilmiştir. Çalışma sonucunda, incelenen farklı kesit şekilleri arasında dairesel şekilli yapının en yüksek enerji emme kapasitesi ile öne çıktığı belirlenmiştir.

Zied et al. (2015), bal peteği şeklindeki yapının düzlem içi direngenliğini önemli ölçüde artıran iki yeni tasarım sunmuştur. Bu tasarımlardan biri olan, berkitici ile güçlendirmiş re-entrant öksetik yapı hem eksenel hem de yanal modülde iyileşmeler sergilemiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile yapılarıdaki birim hücre boyutlarının etkisi üzerine parametrik bir inceleme yapılmıştır. Berkitici uzunluğunun düzlem içi modül üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Daha uzun berkitici, düzlem içi bağl yoğunluğu önemli ölçüde azaltmış ve sonuç olarak Elastisite modülünü düşürmüştür. Öte yandan, artan berkitici kalınlığı yapıların modülünü artırmıştır. Ayrıca, çeşitli geometrik parametrelere sahip çelik bal peteği numuneler üzerinde basma testleri yapılmış ve sonuçlar sayısal analizlerin sonuçlarıyla karşılaştırılarak iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

Mizzi et al. (2015), üretim kaynaklı yapısal rastgeleliğin 2B kiral öksetik bal peteğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, bu yapıların düzenli ve düzensiz konfigürasyonları sonlu elemanlar simülasyonları aracılığıyla analiz edilmiş ve kiral bal peteği yapılarının deformasyon toleransı sergilediği ortaya konmuştur. Bağ uzunluğunun kalınlığa oranı yeterince yüksek kaldığı ve düzensiz sistemin toplam uzunluk/genişlik oranı düzenli muadilinkine yakın olduğu sürece, bu düzensizliğin bu sistemlerin Poisson oranları üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Ren et al. (2016), desen ölçek faktörü olarak adlandırılan tek bir parametre kullanarak kolayca ayarlanabilen bir öksetik tübüler yapı üretmiştir. Tasarlanan öksetik tübüler yapının kapsamlı bir incelemesi hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan öksetik yapıların çekme ve basma yüklemesi altındaki performansları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmış sonlu eleman (SE) modeli yardımıyla parametrik bir çalışma da yürütülmüştür. Çalışmanın sonucunda, burkulma kaynaklı öksetik tübüler yapının, temel malzemesinin elastomerden

sünek bir metale geçtiğinde öksetik davranışını kaybetme eğiliminde olduğu bulunmuştur. Ayrıca, önerilen tübüler yapının mekanik özelliklerine, desen ölçek faktörü ayarlanarak müdahale edilebilmektedir. Özellikle, desen ölçek faktörü belirli bir değere ayarlandığında hem basma hem de çekme etkisi altında benzer bir öksetik performans elde etmek mümkün hale gelmiştir.

Grima et al. (2016), rastgele kesiklere sahip öksetik plakanın mekanik özelliklerini sayısal olarak incelemiştir. Gözlemlerine göre, rastgele kesiklere sahip plaka öksetik davranış sergilemiş ve düzensizlik geleneksel yapının deformasyon modunu bir miktar etkilemiştir.

Mohsenadeh et al. (2016), köpük dolgulu kare kesitli tübüler yapıların tek eksenli yarı-statik basınca maruz kalması durumunda ezilme davranışını ve enerji emme özelliklerini inceleyerek, öksetik köpüğün etkisini araştırmışlardır. İnce cidarlı kare tübüler yapıların üzerinde öksetik köpüğün etkisi, enerji emme kapasitesi, özgül enerji emme ve ezilme kuvveti verimliliği açısından deneysel veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu araştırma sonucunda, farklı narinlik ve en-boy oranlarına sahip öksetik köpük dolgulu tübüler yapıların yarı-statik ezilme tepki kuvvetini hesaplamak için ampirik modeller geliştirilmiştir.

Bai et al. (2018), oktagonel enerji emici tübüler yapılar için, bir iç boru, bir dış boru ve birbirine bağlı ağlar içeren yeni bir yapısal konfigürasyon sunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımını kullanan bir metodoloji tanıtılmıştır. Dinamik eksenel yükler altında enerji emme kapasitesini değerlendirmek için araştırmacılar bir dizi deney ve sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, yapıyı çevreleyen ağların sayısı, iç ve dış boruların boyutları olmak üzere çeşitli faktörlerin enerji emicinin ezilmeye dayanıklılık performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Wang, Y et al. (2018), Koch fraktal geometrisine sahip farklı yapıların enerji emme performansını incelemiştir. Çalışmada temel olarak, tek duvarlı bir tasarım ve iki hibrit (çift duvarlı) tasarım dâhil olmak üzere üç farklı Koch fraktal tasarımının çarpışma performansını değerlendirmek amaçlanmıştır. İncelemeler hem deneyler hem de sayısal

analizler ile gerçekleştirilmiş ve çalışma sonucunda, ikinci dereceden hibrit Koch enerji emicilerin özgül enerji emilimi açısından en yüksek performansı gösterdiği ortaya konmuştur.

Wang, H et al. (2020), yer fıstığı şeklindeki boşlukları içeren iki boyutlu öksetik bir yapı tasarlamıştır. Yer fıstığı şekilli boşluklara sahip çok sayıda birim hücreden oluşan numunelerin üretilmesinde eklemeli imalat tekniği kullanılmıştır. Bu yeni tasarımın öksetik etkisini araştırmak için doğrulanmış bir SE modellemesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca, belirli faktörlerin Poisson oranı üzerindeki etkisi araştırılarak bu yenilikçi yapının mekanik özellikleri detaylıca incelenmiştir. Araştırma sonucunda bu yenilikçi tasarımın eliptik boşluklara sahip yapılara kıyasla daha büyük bir negatif Poisson oranına ve düşük gerilim seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir. Araştırma ayrıca, birim hücre boyutlarındaki azalmanın yapının negatif Poisson oranında bir artışa yol açtığını göstermiştir.

Baran and Öztürk (2020), geleneksel re-entrant birim hücrenin direngenliğini arttırmak için eğimli duvarların kullanıldığı yeni bir model ortaya koymuştur. Modifiye edilmiş hücrenin düzlem içi mekanik özelliklerini hesaplamak için analitik ifadeler formüle edilmiştir ve bu ifadeler orijinal çekirdek hücrenin mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, SE modeli kullanılarak her iki çekirdek hücre tipi üzerinde kapsamlı incelemeler gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar mevcut literatür çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen modeller ile önceki çalışmalarda kullanılan modeller arasında mükemmel bir uyum olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, hücre tasarımında yapılacak küçük ayarlamalarla hafif ancak yeterince direngen hücre yapıları elde etme potansiyelinin altı çizilmiştir. Yeni duvarların eklenmesi, hücre parametrelerini değiştirerek yapıya daha fazla esneklik sağlamış ve mekanik özelliklerin belirli gereksinimleri karşılayacak şekilde özelleştirilmesine olanak tanımıştır.

Chen et al. (2020), yükleme eksenine boyunca 2B re-entrant ve üçgen birim hücreleri güçlendirerek öksetik kafes yapısının direngenliğini arttırmak için yeni bir yöntem uygulamıştır. Modifiye edilmiş yapının Poisson oranını, Elastisite modülünü ve direngenlik değerlerini araştırmak için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir.

Zhou et al. (2020), alüminyumdan yapılmış bal peteği şeklindeki ve köpük beton dolgulu yeni bir öksetiğin performansını hem yarı-statik hem de dinamik basma koşulları altında araştırmış, deneysel ve sayısal analiz yoluyla deformasyon modlarını, basınç dayanımını ve enerji emme kapasitesini değerlendirmiştir. Sonuç olarak, köpük betonun yoğunluğunun artmasıyla, dolgulu öksetik peteklerin deformasyon modunun değiştiği belirlenmiştir. Öksetik bal peteği ve köpük beton arasındaki etkileşimin, hücre duvarı malzeme özellikleri, kalınlık ve köpük beton yoğunluğu gibi faktörlerden etkilendiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca, basma hızı yarı-statikten dinamik modlara geçişe neden olmuş ve basınç dayanımı ile enerji emilimini de etkilemiştir. Köpük beton dolgulu öksetik peteğin Poisson oranı, farklı basma hızlarında da negatif kalmıştır.

Xue et al. (2021), boş tüp, öksetik kafes yapısı ve polimer dolgu maddesinden oluşan yeni bir öksetik kompozitin basma etkisindeki mekanik özelliklerine odaklanmıştır. Ezilme davranışının araştırılmasında hem SE analizi hem de deneysel yöntemler kullanılmış ve bunlar kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, üç bileşenli kompozit dolgulu tüplerin hem boş tüplerden hem de öksetik kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuç, üç bileşen arasında oluşan etkileşime atfedilmiştir. Araştırmada aynı zamanda enerji emme özellikleri ve deformasyon modları incelenmiştir. Öksetik kompozitlerin dolgu ile birlikte kullanılması, yapıların enerji emme kapasitesinin önemli ölçüde arttırmış ve boş tüplerde çatlak başlangıcını ve yayılmasını önemli ölçüde geciktirmiştir.

Zhang et al. (2021), önceki iki boyutlu yer fıstığı boşluklu modellerinden yola çıkarak tübüler bir yapı oluşturmuşlardır. Bu özel konfigürasyonun Poisson oranını belirlemek için parametrik bir inceleme yapmışlardır. Yer fıstığı şeklindeki yapının tübüler formunun, basınç kuvvetleri etkisi altında öksetik özellikler sergilediği deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir.

Wang et al. (2021), yer fıstığı boşluklu iki boyutlu öksetik yapılardaki boşluk düzensizlikleri üzerine bir inceleme gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, rastgele yönlendirilmiş boşlukların ve/veya boşluklardaki boyutsal düzensizliklerin, yapıların Poisson oranları ve direngenlikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal analizler sonucunda, rastgele yönelimli düzensizliğe sahip yapıların, düşük öksetik

davranışa ve yüksek direngenliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, boyutsal düzensizliğe sahip yapılar, boşluk boyutunun artmasıyla birlikte yüksek öksetik davranış ve düşük direngenlik sergilemiştir.

Ruan et al. (2021), kare şeklindeki birim hücre üzerinde oluşturulan yüzey girintileriyle yeni bir yapı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında hem SE analizi hem de deneyler gerçekleştirerek çeşitli geometrik parametreler yardımıyla yapıların Poisson oranlarını ve direngenliklerini araştırmışlardır. Sonuçlar, negatif Poisson oranının ve yüksek direngenliğin eşzamanlı olarak var olabilmesine imkân tanımıştır ve bu yapılardaki minimum Poisson oranı -0,28 olarak bulunmuştur.

Ren et al. (2022), köpük dolgulu öksetik tübüler yapıların direngenlik ve enerji emme kabiliyetlerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu deneysel çalışma, karşılaştırmalı SE analizi ile desteklenmiştir. Deneyler sonucunda, söz konusu malzemeler arasındaki etkileşimde kayda değer bir gelişme elde edildiği ifade edilmiştir.

Luo et al. (2022), beton dolgulu kompozitler oluşturmak için öksetik ve öksetik olmayan çelik tübülerler kullanmıştır. Bu çalışma, beton ve çelik arasındaki aderansı geliştirmeyi, çelik yapının yerel burkulmasını ele almayı ve yetersiz beton kuşatmasını azaltmayı amaçlayan yeni bir metodoloji ortaya koymuştur. Bu yeni metodolojiyle, iki malzeme arasındaki aderansın önemli ölçüde geliştirildiği söylenmiştir. Söz konusu beton dolgulu öksetik kolonlar, performans ve deformasyon özellikleri açısından belirgin avantajlar sergilemiştir. Bunlar avantajlar arasında, üstün beton kuşatma etkisi, arttırılmış süneklik, yükseltilmiş tokluk ve dışa doğru yerel burkulmanın önlenmesinin yer aldığı ifade edilmiştir.

Zhong et al. (2022), hem tek hem de katmanlı öksetik alüminyum petek yapıları içeren beton kompozitlerin yenilikçi bir tasarımını, üretimini ve incelenmesini gerçekleştirmiştir. Araştırma, tek eksenli basma altında deformasyon modu, ezilme dayanımı ve enerji emme kapasitesi gibi temel özelliklere odaklanmıştır. Deneysel verilerle desteklenen sayısal modeller, kompozitlerin mekanik özelliklerinin parametrik analizini yapmak için kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, katmanlı beton kompozitin, tekli muadiline kıyasla daha yüksek tepe ezilme kuvvetine ve enerji emme kapasitesine

sahip olduğu belirlenmiştir. Hem tekli hem de katmanlı kompozit yapılar X tipi deformasyon modu sergilemiştir. Ayrıca, hücre duvar kalınlığı ve hücre açısının, yapıların enerji emme kapasitesi ve ilk tepe ezilme kuvveti üzerinde doğrudan etkisinin olduğu ifade edilmiştir.

Zhang et al. (2022), öksetik tübüler yapıların taşıma kapasitesini ve stabilitesini arttırmak amacıyla, ayarlanabilir direngenliğe sahip yeni bir yapı tasarlamışlardır. Numuneler 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilmiş ve ardından tek eksenli basma testleri yapılmıştır. Bu testler sayesinde yapıların mekanik özellikleri ve deformasyon karakteristikleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaya ek olarak SE modeli geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayarlanabilir direngenlikteki öksetik yapının basma süreci ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi yapının elastik, direngenlik değişimi, yoğunlaşma ve burkulma şeklinde dört farklı davranış aşaması olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca bağlantı parçalarının, gerilme-şekil değiştirme eğrisi, Poisson oranı ve yapısal stabilite üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir analiz yapılmıştır. Merkezi bağlantı kolonunun uzunluğunun dikkatli bir şekilde ayarlanmasıyla, öksetik yapı ayarlanabilir direngenlik, artırılmış stabilite ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde edilebilmiştir.

Huo et al. (2022), geleneksel iç tübüler yapı ve öksetik dış tübüler yapının kullanıldığı yeni bir hibrit yapı tanıtmıştır. Çalışmada, çelik tübüler yapı üzerinde ortogonal oval boşluklar açılarak öksetik tübüler yapılar oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda, dış öksetik yapının varlığının, iç tübüler yapının deformasyon modunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir.

Han et al. (2023), eliptik boşlukların farklı konfigürasyonlarını içeren öksetik yapıların basma etkisindeki mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Geleneksel eliptik tasarımları geliştirmek için, düşük ağırlıklı öksetik tübüler yapılar önerilmiştir. Söz konusu yapıların enerji emme kabiliyetlerini karşılaştırmak için kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Huo et al. (2023), köpük dolgulu öksetik kare tübüler yapılara özel olarak odaklanarak, öksetik dairesel ve kare tübüler yapıların mekanik özelliklerinin

karşılaştırmalı bir analizini sunmuştur. Çalışılan dört öksetik yapı arasında, köpük dolgulu öksetik kare yapılar en yüksek özgül enerji emilim değerleri ile öne çıkmıştır. Deneysel veriler ve SEY analiz sonuçları mükemmel bir uyum göstermiştir. Çalışmada ayrıca, duvar kalınlığı, yükseklik ve eliptiklik gibi faktörlerin köpük dolgulu öksetik kare tübüler yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için SE analizleri ile parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, daha ince duvar kalınlığının tepe kuvvetinin azalmasına ve özgül enerji emiliminin artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Eliptiklik azaldıkça, tübüler yapının özgül enerji emiliminde kademeli bir artış görülmüştür.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

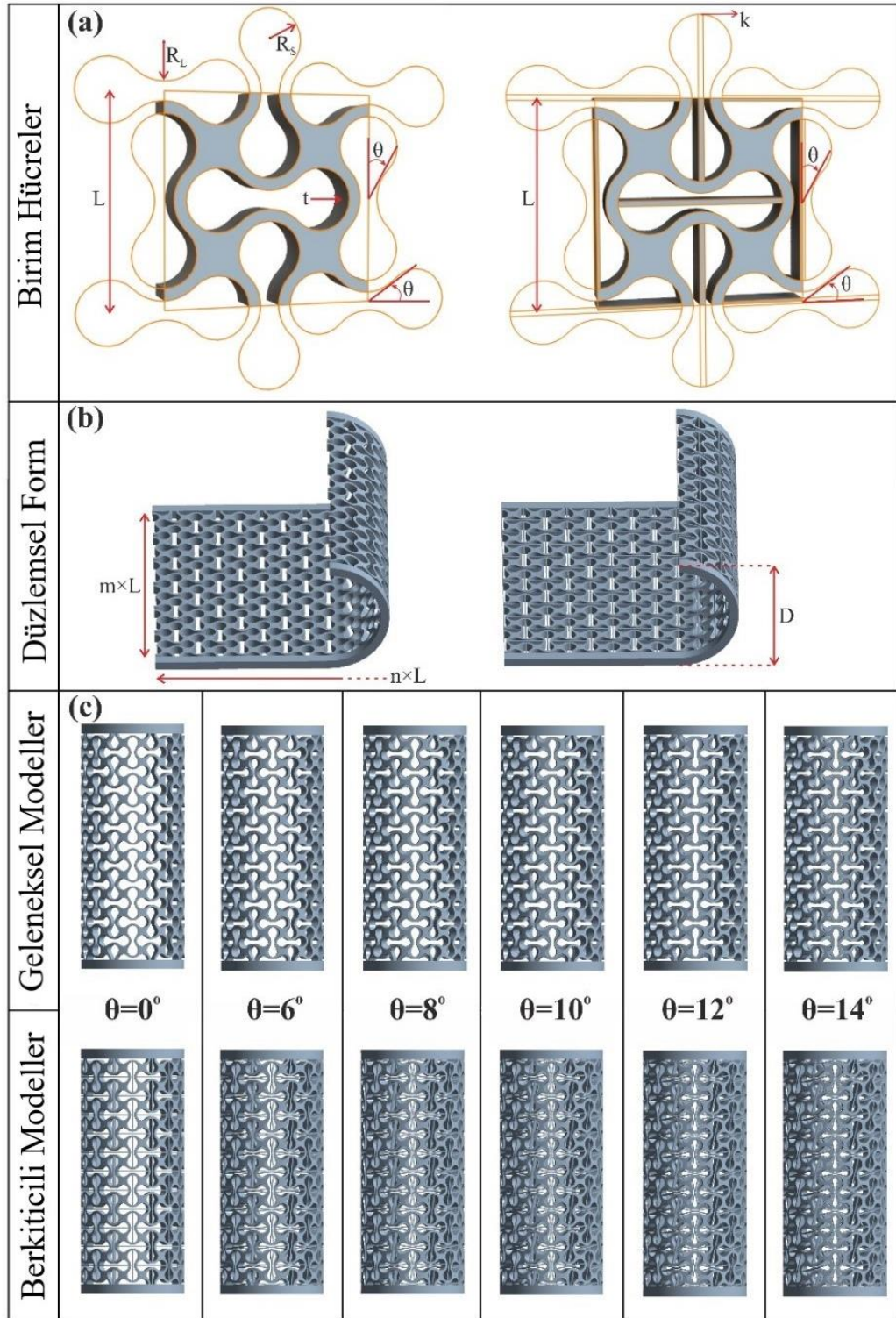
Bu çalışmada, öksetik tübüler yapıların mekanik özelliklerini belirlemek ve farklı uygulamalarını incelemek amacıyla üç farklı araştırma alanı belirlenmiştir. İlk bölümde, birim hücrelerin döndürülmesinin ve berkiticilerin kullanılmasının, yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların mekanik davranışları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan SEY analizlerinin detayları sunulmuştur. İkinci bölümde, öksetik tübüler yapıların enerji emme yetenekleri üzerinde durulmuştur ve dönen deformasyon mekanizmalarına sahip farklı öksetik tübüler yapıların yarı-statik ezilme davranışının incelendiği deneyler ve sayısal analizler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise farklı Poisson oranlarına ve poroziteye sahip beton dolgulu öksetik çelik kolonların mekanik özelliklerinin SEY analizleriyle parametrik olarak incelenmesi kapsamında yapılan çalışmaların detayları sunulmuştur.

3.1. Yer Fıstığı Boşluklu Öksetik Tübüler Yapıların Poisson Oranlarının ve Direngenliklerinin Belirlenmesi

3.1.1. Yer fıstığı boşluklu öksetik tübüler yapıların tasarımı

Yer fıstığı şeklindeki birim hücreler, iki küçük daire ve iki büyük dairenin birleştirilmesiyle veya Cassini denklemleri kullanılarak oluşturulabilmektedir (Wang et al. 2021). Bu bağlamda, modelleme sürecini basitleştirmek adına daire tabanlı tasarımın kullanılması tercih edilmiştir. Tasarım aşamasında Zhang et al. (2021) tarafından önerilen döndürülmemiş modelin (geleneksel model) geometrik boyutları referans alınmıştır ve modelleme sürecinde SolidWorks 2019 yazılımı (Dassault Systems, Massachusetts, ABD) kullanılmıştır. Ayrıca, yer fıstığı şeklindeki boşlukların merkezine 0,5 mm kalınlığında berkiticiler yerleştirilerek berkiticili yeni birim hücreler modellenmiştir (Şekil 3.1 (a)). Birim hücreleri kullanarak tübüler yapıların oluşturulmasında, ilk önce bir plaka üzerine yer fıstığı şeklindeki boşluklar yatay ve dikey olarak yerleştirilmiştir. Daha sonra, bu düzlemsel plaka yan yüzler birleşene kadar yuvarlanmış (Şekil 3.1 (b)) ve düzlemsel plakanın tüm bitişik kenarları birleştirilerek katı bir yapı olacak şekilde öksetik tübüler yapılar oluşturulmuştur.

Yer fıstığı boşluklu birim hücreler, merkezlerinden θ açısı kadar Şekil 3.1 (a)'da gösterildiği yönde döndürülmüştür. Hem geleneksel hem de berkiticili birim hücreler için dönme açısı (θ) 0° , 6° , 8° , 10° , 12° ve 14° olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, Şekil 3.1 (c)'de gösterildiği gibi toplam 12 farklı tübüler yapı modellenmiştir. Yer fıstığı şeklindeki boşlukların birbirleriyle temas etmesini ve yapısal bütünlüğü bozmasını önlemek için döndürme açısının değeri en fazla 14° olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Berkiticilerin ve değişen açılarının etkilerinin net bir şekilde değerlendirilebilmesi için tüm modellerde geometrik boyutlarda tutarlılık sağlanmıştır. Oluşturulan yapılar 130 mm yüksekliğe (H) ve 54,93 mm dış çapa sahiptir. Modellerin üst ve alt kısmına 5 mm kalınlığında iki halka eklenerek tübüler yapıların uç kısımlarında gerçekleşmesi muhtemel olan lokal deformasyonlar önlenmiştir. Şekil 3.1'de yer fıstığı şeklindeki boşlukların birim hücrelerden tübüler şeklinde bir konfigürasyona dönüştürülmesine yönelik genel metodoloji gösterilmiştir. Küçük daire yarıçapı (R_s), büyük daire yarıçapı (R_L), birim hücre uzunluğu (L), duvar kalınlığı (t), dış çap (D) ve berkitici kalınlığı (k) gibi temel geometrik parametrelerin ayrıntıları Çizelge 3.1'de tüm modeller için sunulmuştur.



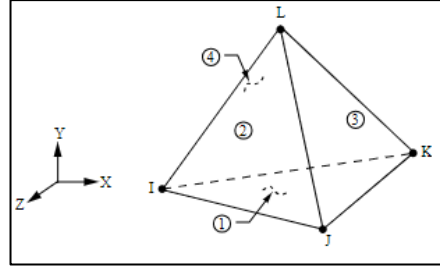
Şekil 3.1. Yer fıstığı boşluklu tübülerlerin tasarım aşamaları: (a) geleneksel ve berkiticili birim hücreler, (b) kare şeklinde düzenlenmiş düzlemsel plakalar, (c) öksetik tübüler modeller.

Çizelge 3.1. Birim hücrelerin geometrik parametreleri ve tübülerlerin genel boyutları

Birim Hücrelerin Geometrik Parametreleri				Tübüler Yapıların Genel Boyutları			
θ	R_s (mm)	R_L (mm)	L (mm)	H (mm)	D (mm)	t (mm)	k (mm)
0°	3	4	20	130	54,93	4	0,5
6°							
8°							
10°							
12°							
14°							

3.1.2. Sonlu elemanlar modeli

Tasarımı yapılan öksetik tübüler yapıların tek eksenli basınç altındaki mekanik davranışları hakkında bilgi edinmek için 3B SE modeli geliştirilmiştir. Temel analizler gerçekleştirilmeden önce, Zhang et al. (2021) tarafından yapılan ve döndürülmemiş geleneksel yer fıstığı boşluklu tübüler bir yapının hem deneysel hem de sayısal olarak incelendiği çalışma dikkate alınarak bir gerçekleştirme çalışması yapılmıştır. İlgili çalışmada incelenen döndürülmemiş geleneksel yer fıstığı boşluklu tübüler yapı Ansys Workbench 21 (Ansys Inc., PA, ABD) yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar literatür çalışmasıyla karşılaştırılarak sayısal modelin sınır koşulları ve optimum ağ boyutu belirlenmiştir. Oluşturulan SE modelinde, mevcut literatür çalışmaları dikkate alınarak 4 düğümlü tetrahedral elemanlar (Solid285) kullanılmıştır. SOLID285 (tetrahedral), dört düğüm noktasına sahip üç boyutlu bir elemandır (Şekil 3.2). Bu eleman, her düğüm noktasında dört serbestlik derecesine sahiptir ve plastisite, hiperelastisite, büyük deformasyonlar ve büyük gerilmeler için uygundur (Anonymous 2013). Bu eleman tipi, elemanlardaki yüksek çarpımalardan kaynaklanan analiz hatalarını en aza indirmesinden ve karmaşık geometriler için uygun olmasından dolayı seçilmiştir (Alomarah et al. 2019; Yao et al. 2020; Zhang et al. 2021). Ayrıca, optimum ağ boyutunu belirlemek için yedi farklı eleman boyutu (1,3, 1, 0,8, 0,5, 0,4, 0,3 ve 0,2 mm) kullanılarak bir ağ yakınsama çalışması da gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmasının deney numunelerinin üretiminde kullanılan fotopolimer reçinenin (VeroWhite Plus, Stratasys Co., Minnesota, ABD) doğrusal elastik malzeme özellikleri SE analizlerinde kullanılmıştır. Çekme testinden elde edilen Poisson oranı, yoğunluk ve Elastisite modülü değerleri sırasıyla 0,413, 1,15 g/cm³ ve 1,114 GPa olarak verilmiştir (Zhang et al. 2021).



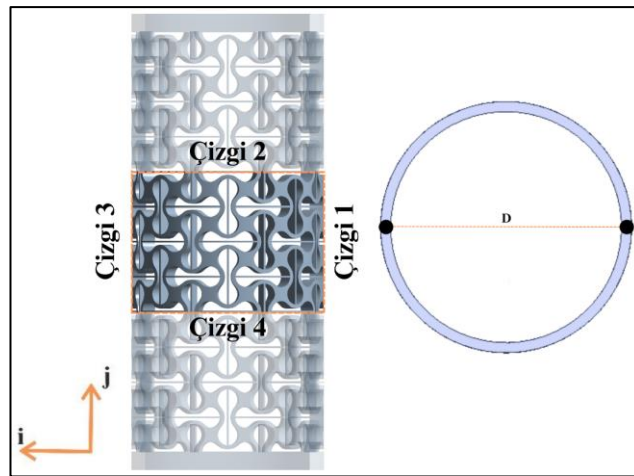
Şekil 3.2. Solid285 ağ elemanı (Anonymous 2013)

SE analizinde, modellerin alt yüzeylerinin tüm yönlerdeki dönme ve ötelenme hareketi kısıtlanmış ve modellerin üst yüzeyi 5 mm aşağı doğru yer değiştirmeye zorlanmıştır. Poisson oranının hesaplanması, sırasıyla ϵ_i ve ϵ_j olarak gösterilen i ve j yönlerindeki basınç şekil değiştirmeleri dikkate alınmıştır. Yapıların ortasında bulunan çizgilerin yatay ve dikey yer değiştirmeleri kullanılarak, aşağıda verilen denklemler yardımıyla yapıların Poisson oranları hesaplanmıştır (Şekil 3.3).

$$\nu_{ij} = - \frac{\text{yanal birim şekil değiştirme}}{\text{eksenel birim şekil değiştirme}} = - \frac{\epsilon_i}{\epsilon_j} \quad (3.1)$$

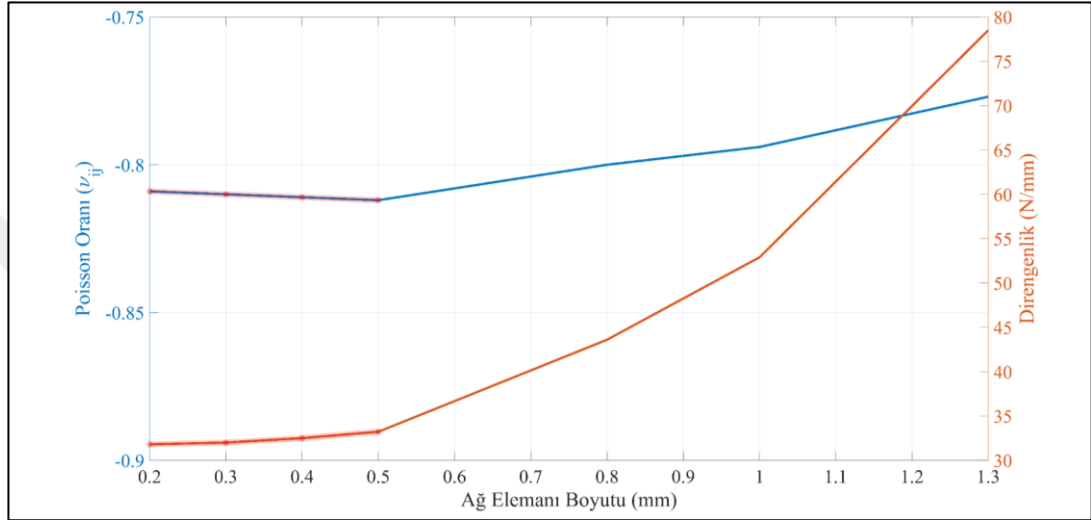
$$\epsilon_i = \frac{\text{Çizgi 1}-\text{Çizgi 3}}{D} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_j = \frac{\text{Çizgi 2}-\text{Çizgi 4}}{2L} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3. Çizgi yer değiştirmesinin şematik gösterimi

Yapıların direngenlik değerleri ise yük-yer değiştirme eğrilerinin eğiminden belirlenmiştir. Gerçekleme analizlerinden elde edilen ve ağ eleman boyutunun yapıların Poisson oranı ve direngenliği üzerindeki etkisini gösteren eğriler Şekil 3.4'te verilmiştir. Boyut etkisinin, 0,5 mm eleman boyutu ile azaldığı görülmektedir. Bu nedenle Zhang et al. (2021) tarafından bulunan sonuçlar da göz önüne alınarak ağ elemanı boyutu 0,5 mm olarak seçilmiştir.



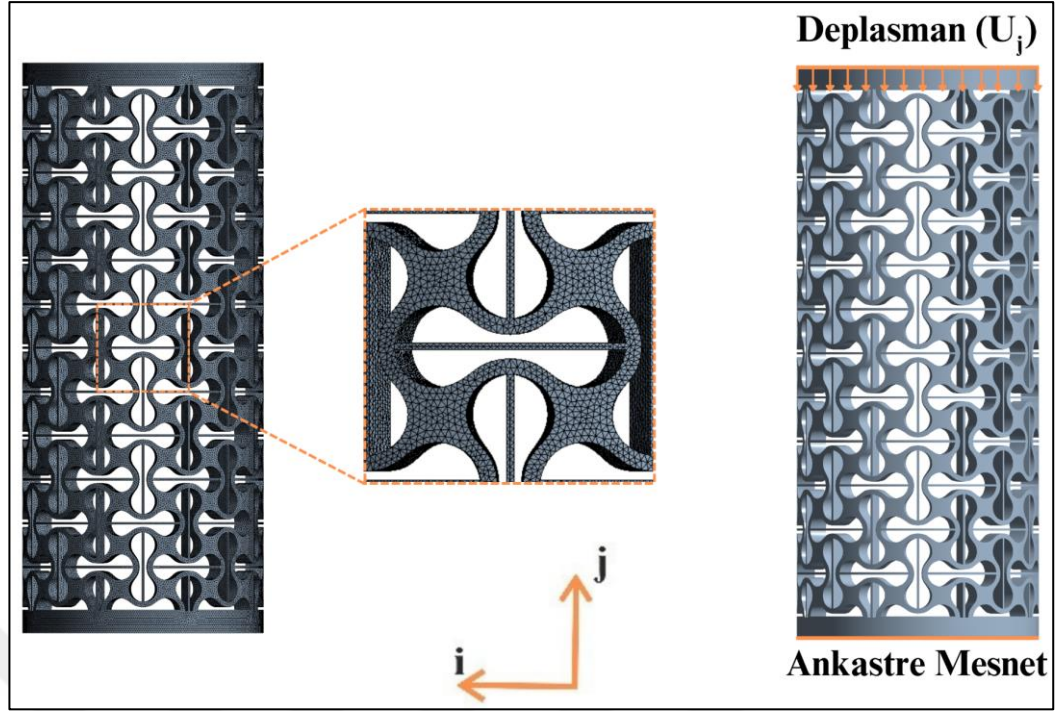
Şekil 3.4. Ağ yakınsama çalışmasının sonuçları

Çizelge 3.2'de, Zhang et al. (2021) tarafından elde edilen sonuçlar ile bu tez çalışmasında gerçekleştirilen SE analizi sonuçlarının karşılaştırması sunulmuştur. Çizelge 3.2'deki verilere göre, Poisson oranı ve deplasman çizgisi yer değiştirme değerlerinin yaklaşık %2'lik bir hata ile iki sonuç seti arasında çok yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapılardaki en büyük von Mises gerilmeleri, Zhang et al. (2021) tarafından yapılan sayısal analizde edilen 19,871 MPa değerine oldukça yakın olarak 22,1 MPa değerinde bulunmuş ve bu gerilmelerin yapıda aynı bölgelerde oluştuğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ve gerçekleme analizi bulgularındaki bu tutarlılık, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin yapının gerçek davranışını iyi bir şekilde yansıttığını ve daha ileri analizler için güvenilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.2. Çizgi yer değiştirmelerinin karşılaştırılması

Basma Değeri (mm)	Çizgi Yer Değiştirmesi (mm)							
	Zhang et al. (2021)				SEY			
	Çizgi 1	Çizgi 2	Çizgi 3	Çizgi 4	Çizgi 1	Çizgi 2	Çizgi 3	Çizgi 4
0,5	-0,129	-0,376	0,109	-0,149	-0,121	-0,357	0,120	-0,143
1	-0,248	-0,733	0,228	-0,297	-0,241	-0,714	0,241	-0,286
1,5	-0,366	-1,109	0,347	-0,446	-0,362	-1,072	0,361	-0,429
2	-0,485	-1,455	0,475	-0,584	-0,482	-1,429	0,481	-0,572
2,5	-0,624	-1,822	0,604	-0,733	-0,602	-1,786	0,602	-0,715
3	-0,743	-2,188	0,713	-0,871	-0,723	-2,143	0,722	-0,858
3,5	-0,861	-2,545	0,846	-1,009	-0,843	-2,500	0,843	-1,001
4	-0,970	-2,891	0,970	-1,158	-0,964	-2,857	0,963	-1,144
4,5	-1,099	-3,267	1,119	-1,297	-1,085	-3,215	1,083	-1,287
5	-1,218	-3,624	1,228	-1,446	-1,959	-3,571	1,958	-1,430
Poisson Oranı	-0,805				-0,8137			

Sonuç olarak, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar Zhang et al. (2021) tarafından yayınlanan bulgularla güçlü bir uyum göstermiştir ve gerçekleştirilen tüm sayısal analizlerde, yapılar için aynı malzeme parametreleri, ağ tipi ve sınır koşulları kullanılmıştır. Analizlerde 0,5 mm'lik bir ağ elemanı boyutunun kullanılmasıyla, geleneksel tübüler yapılarda 506.887 düğüm ve 2.319.326 eleman elde edilirken, berkiticili tübüler yapılarda 644.198 düğüm ve 2.768.057 eleman olduğu belirlenmiştir. Ağ yapısı ve analizin sınır koşulları Şekil 3.5'te görsel olarak verilmiştir. Yapıların Poisson oranları ve direngenlik değerleri daha önce açıklandığı gibi hesaplanmış ve yapılardaki von Mises gerilme dağılımları da incelenmiştir. Ayrıca daha yüksek yer değiştirmeler altında, berkiticilerin davranışını ve boşluklardaki yüzeylerin birbirine temas etme durumlarını incelemek için, seçilen iki model üzerinden doğrusal olmayan ilave analizler de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, dönmeyen geleneksel ve berkiticili geleneksel öksetik yapılar kullanılmış ve doğrusal olmayan analizde yapılara 25 mm'lik bir yer değiştirme uygulanmıştır. Bu analizlerde, her bir yer fıstığı boşluğunun iç yüzeyine sürtünme katsayısı atanmıştır ve bu değer önceki literatür çalışmaları dikkate alınarak 0,3 olarak belirlenmiştir (Xiao et al. 2019; Wang, Q et al. 2020).

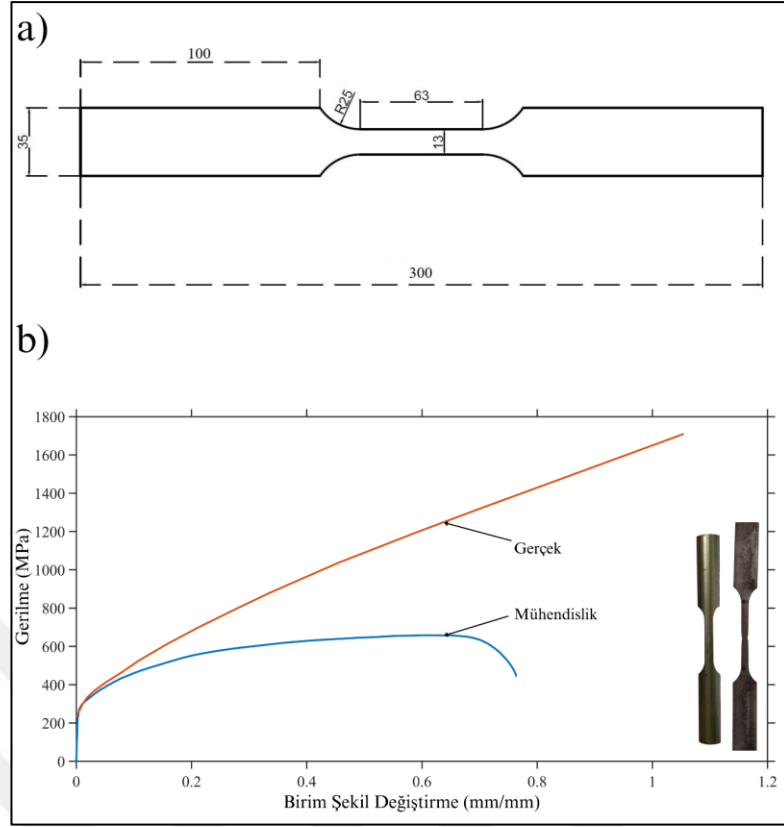


Şekil 3.5. SEY analizlerinde kullanılan sınır koşulları ve ağ elamanı detayı

3.2. Öksetik Tübüler Yapıların Ezilme Davranışı

3.2.1. Malzeme özellikleri

Ezilme davranışı incelenen öksetik tübüler yapılar, 2 mm kalınlığa ve 50 mm dış çapa sahip olacak şekilde AISI 304L paslanmaz çelik (Anandan et al. 2019; Feng et al. 2022) kullanılarak üretilmiştir. Paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM E8M test prosedürüne göre çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6 (a)'da boyutları verilen ve tübüler yapının duvarından kesilerek elde edilen toplam altı adet test numunesi çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme testleri, 5 mm/dak sabit hızda gerçekleştirilmiştir. AISI 304L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri, gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Şekil 3.6 (b)) kullanılarak belirlenmiş ve bu özellikler Çizelge 3.3'te özetlenmiştir. ANSYS/Ls-Dyna malzeme kartını oluşturmak için Şekil 3.6 (b)'de gösterilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.6. (a) Çekme numunelerinin geometrik boyutları (mm), (b) çekme testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Çizelge 3.3. 304L paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri

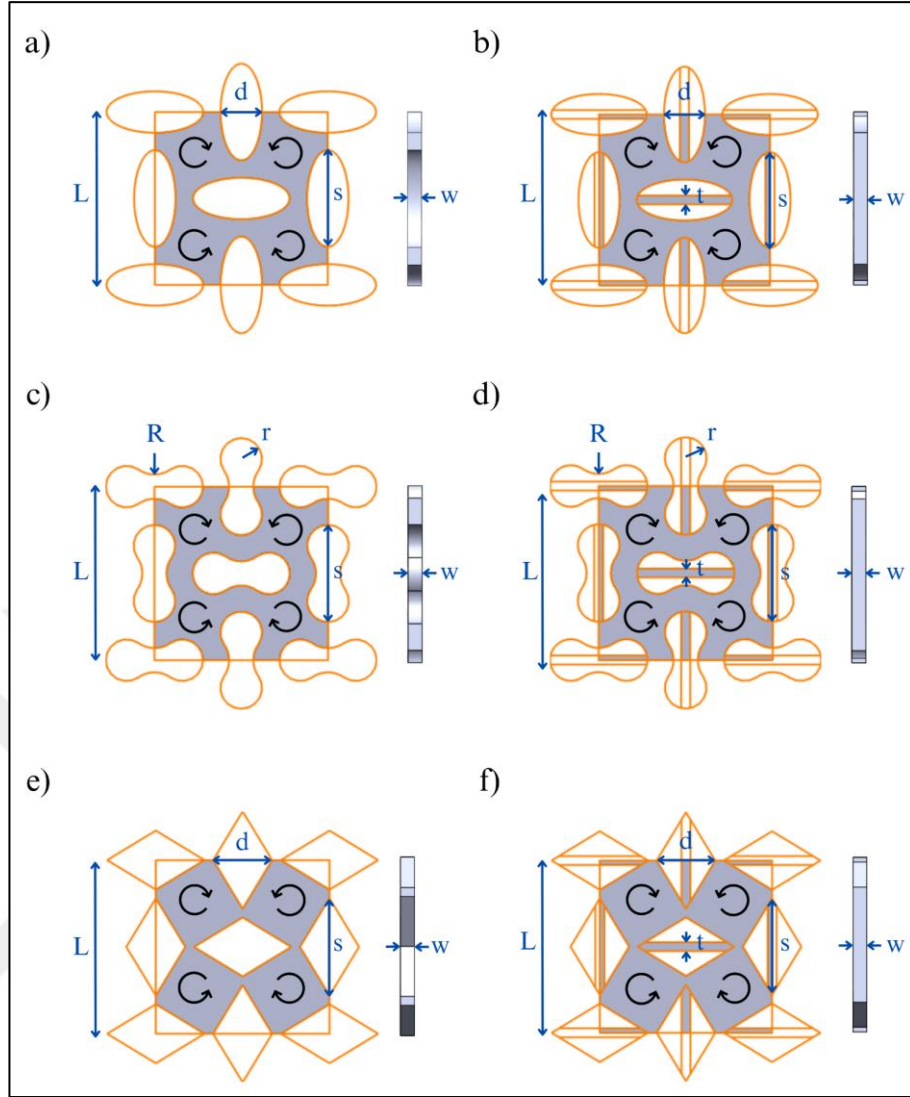
Yoğunluk (kg/m^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)
7830	193	0,3	221

3.2.2. Geometrik modelleme ve üretim

İncelenen öksetik yapılar, içi boş tübülerlerin duvarında eliptik, yer fıstığı ve kare şekilli boşlukların, ortogonal olarak oluşturulmasıyla modellenmiştir. Yapıların modelleri, SolidWorks 2019 yazılımı kullanılarak dikkatlice oluşturulmuştur. Eliptik şekil için, Ren et al. (2016) tarafından önerilen en/boy oranı kullanılmıştır. Yer fıstığı şekli, Wang, H et al. (2020) tarafından önerilen yöntem kullanılarak modellenmiş, kare şekli ise Grima and Evans (2000) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak keskin köşeler ve düz kenarlarla oluşturulmuştur. Şekil 3.7’de, yukarıda bahsedilen öksetik yapıların oluşturulmasında kullanılan birim hücrelerin geometrik parametreleri gösterilmiş ve bu parametrelerin değerleri Çizelge 3.4’te verilmiştir. Çalışmada

kullanılan bu geometrilerin seçilmesinde, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi basma etkisi altındaki deformasyon mekanizmalarının benzer olması dikkate alınmıştır.

Birim hücrelerin tasarımında kullanılan geometrik parametreler, birim hücre kenar uzunluğu (L), duvar kalınlığı (w), büyük daire yarıçapı (R), küçük daire yarıçapı (r), berkitici kalınlığı (t), boşlukların uzun kenar uzunluğu (s) ve boşlukların kısa kenar uzunluğudur (d). Öksetik yapıların mekanik özelliklerinin tam olarak karşılaştırılabilir olması için, yapıların birim hücre sayısının, birim hücre uzunluklarının, porozitelerinin ve yüzey alanlarının mümkün olduğunca birbirine yakın olması sağlanmıştır. Porozite, yapıdaki boşluk durumunu yansıtan bir özelliktir ve yapıdaki boşluk hacminin, yapının tüm hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Tüm yapılar arasında berkitici etkisini karşılaştırmak için de her bir boşluğun uzunluğu tüm modeller için aynı tutulmuştur. Eliptik, yer fıstığı ve kare şekilli boşluklar kullanılarak toplam altı model tasarlanmış ve sonuçta üç geleneksel öksetik tübüler ve üç berkiticili modifiye edilmiş öksetik tübüler yapılar elde edilmiştir.

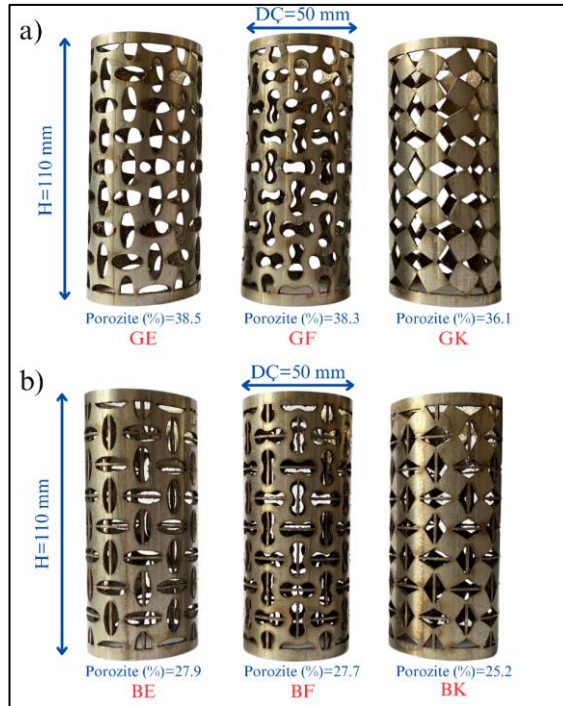


Şekil 3.7. Basınç altında benzer deformasyon mekanizmasına sahip birim hücrelerin detayları (önden ve yandan görünüm): (a) geleneksel eliptik, (b) berkiticili eliptik, (c) geleneksel yer fıstığı, (d) berkiticili yer fıstığı, (e) geleneksel kare, (f) berkiticili kare.

Çizelge 3.4. Birim hücrelerin geometrik detayları

Birim hücreler	L (mm)	w (mm)	s (mm)	d (mm)	R (mm)	r (mm)	t (mm)
Geleneksel eliptik-şekilli	25	2	14	6	-	-	-
Geleneksel yer fıstığı-şekilli	25	2	14	-	4	3	-
Geleneksel kare-şekilli	25	2	14	8,5	-	-	-
Berkiticili eliptik-şekilli	25	2	14	6	-	-	1,3
Berkiticili yer fıstığı-şekilli	25	2	14	-	4	3	1,3
Berkiticili kare-şekilli	25	2	14	8,5	-	-	1,3

Bu karmaşık tasarımlı öksetik yapıları üretilmesi için eklemeli imalat (Joseph et al. 2021) ve lazer kesim teknolojisi de (Linforth et al. 2021) dahil olmak üzere çok sayıda üretim tekniği literatürde önerilmiştir. Boşluklu metalik tübüler yapıların oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında, boru lazer kesim yöntemi en sık karşılaşılan tekniklerden biridir (Gomes et al. 2023). Bu üretim tekniği hassasiyet, esneklik, erişilebilirlik ve maliyet gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır (Scintilla et al. 2013; Linforth et al. 2021; Zhu et al. 2023). Bu nedenle, boru lazer kesim yöntemi numune üretimi için en uygun seçim olarak kabul edilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm metalik tübüler yapılar aynı üreticiden tedarik edilmiştir. Tüm tübüler öksetikler $H=110$ mm yükseklik ve $DÇ=50$ mm dış çap ile karakterize edilmiştir. Deneyler sırasında ortaya çıkabilecek olası lokal dengesizlikleri ve deformasyonları önlemek amacıyla, öksetik tübüler yapıların üst ve alt kısımlarına 5 mm yüksekliğinde halkalar yerleştirilmiştir. Tübüler yapıların çap değerlerinin belirlenmesinde ASTM-A269 standardı dikkate alınmıştır. Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi, birbirlerinden ayırt edilmelerini ve test bulgularının karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için imal edilen numunelere kısaltılmış isimler verilmiştir. İmal edilen geleneksel ve berkiticili tübüler yapılar, sahip oldukları porozite yüzdeleri ile birlikte Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



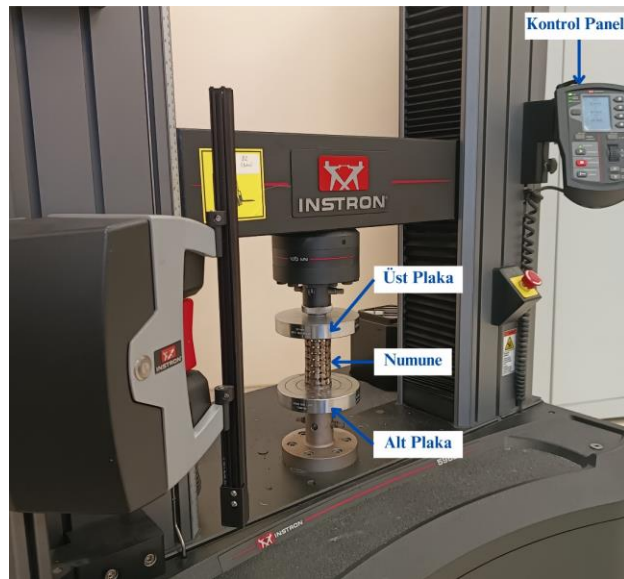
Şekil 3.8. Ezilme davranışı incelenen öksetik tübüler yapılar: (a) geleneksel öksetik yapılar, (b) berkiticili öksetik yapılar.

Çizelge 3.5. Üretilen numunelerin kısaltmaları

	Eliptik-şekilli	Yer fıstığı-şekilli	Kare-şekilli
Geleneksel öksetik tübüler yapılar	GE	GF	GK
Berkitici öksetik tübüler yapılar	BE	BF	BK

3.2.3. Basınç deney düzeneği

Yapıların ezilme etkisindeki deformasyonlarını ve enerji emme kapasitelerini ayrıntılı olarak değerlendirmek için tüm numunelere yarı-statik basma testi uygulanmıştır. Basma testleri, Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Instron 5982 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numuneler sabit alt plaka üzerine yerleştirilmiş ve Şekil 3.9'de görüldüğü gibi üst plaka tarafından 5 mm/dak sabit bir hızla (Simpson and Kazancı 2020) aşağı yönde ezilmiştir. Tüm basma testlerinde 100 kN'luk bir yük hücresi kullanılmıştır. Deneylerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla her bir yapı için deneyler beş kez tekrar edilmiş ve yapıların değerlendirilmesinde, deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması dikkate alınmıştır. Her bir numuneye 45 mm'lik düşey yer değiştirme uygulanmış ve böylece numunelerde, model yüksekliğinin yaklaşık %40'ı değerinde bir ezilme oluşması sağlanmıştır. Kuvvet ve yer değiştirme değerleri, deney cihazındaki yüksek hassasiyetli sensörler yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında, deney düzeneğinin önüne yerleştirilen bir kamera kullanılarak tübüler yapıların deformasyonları da kaydedilmiştir.



Şekil 3.9. Basma deneyi düzeneği

3.2.4. Ezilme performansı ölçütleri

Ezilme etkisi altındaki yapıların enerji emme davranışını değerlendirmek için literatürde farklı ezilme parametrelerinden bahsedilmektedir (Yin et al. 2011; Xu et al. 2014; Mohsenizadeh et al. 2015). Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, genel olarak bu tür yapıların enerji emme kapasitesini temsil etmektedir. Enerjinin sadece küçük bir kısmı elastik deformasyon aşamasında absorbe edilirken, çoğunluğu plastik deformasyon yoluyla absorbe edilmektedir. Dolayısıyla, plastik bölgede emilen enerji, yapının genel davranışını ortaya koymaktadır (Gao et al. 2019). Bu çalışmada dikkate alınan temel ezilme ölçütleri aşağıda açıklanmıştır:

Toplam enerji emilimi (EA), ezilme etkisinde bir yapı tarafından emilen ve dağıtılan toplam enerji miktarını belirlemek için kullanılan bir ölçüttür. Emilen toplam enerji, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altındaki alana eşittir ve matematiksel olarak Denklem 3.4 ile ifade edilmektedir. Burada F , yapıya uygulanan kuvvet, d ise nihai deformasyon uzunluğudur. Bu çalışmada yapılan deneylerde, nihai yer değiştirme 45 mm olarak uygulanmıştır.

$$EA = \int_0^d F(x)dx \quad (3.4)$$

Yapıların ağırlığını dikkate alan özgül enerji emme kriteri (SEA), enerji emme performansının göreceli bir ölçüsünü ifade etmektedir. Özgül enerji emme, Denklem 3.5'te verildiği gibi, toplam emilen enerjinin yapının kütlesine (m) bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (3.5)$$

Ortalama ezilme kuvveti (MCF), Denklem 3.6'da gösterildiği gibi, ezilme sırasında emilen toplam enerjinin, nihai deformasyon uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (3.6)$$

İlk tepe ezilme kuvveti ($P_{initial}$), tepe kuvvetinin ilk oluşumunu temsil ederken, en büyük ezilme kuvveti (P_{max}) ise basma sırasında eksenel yöndeki en yüksek kuvvettir (Denklem 3.7) ve ortalama ezilme kuvvetine mümkün olduğunca yakın olmalıdır.

$$P_{max} = \max[F(x)] \quad (3.7)$$

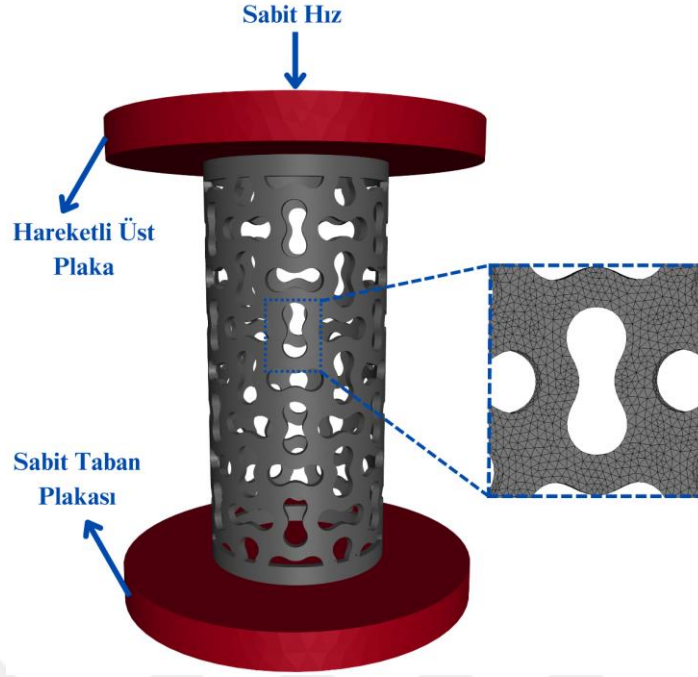
Son olarak, ezilme kuvveti verimliliği (CFE), Denklem 3.8’de gösterildiği gibi ortalama ezilme kuvvetinin, en büyük ezilme kuvvetine (P_{max}) bölünmesiyle hesaplanan bir parametredir.

$$CFE = \frac{MCF}{P_{max}} \times 100\% \quad (3.8)$$

3.2.5. Sonlu elemanlar modeli

Öksetik yapıların ezilme davranışını ayrıntılı olarak incelemek ve değerlendirmek için deneyler dikkate alınarak SE modeli oluşturulmuştur. Tübüler yapıların sayısal analizleri, doğrusal olmayan SE çözücüsü ANSYS/Ls-Dyna kullanılarak explicit yaklaşım ile oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan sayısal yöntem aşağıda açıklanmıştır.

Sayısal model, hareketli üst plaka, sabit alt plaka ve numune olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır ve basma testi, Şekil 3.10’da görüldüğü gibi numunenin bu iki plaka arasına yerleştirilmesiyle simüle edilmiştir. Üst plakanın hareketi sadece ezilme doğrultusunda serbest bırakılmış, diğer yönlerde dönme ve ötelenme engellenmiştir. Mevcut literatür çalışmaları (Jiang and Hu 2017b; Alomarah et al.2019) ve tübüler yapıların karmaşık geometrisi dikkate alınarak, analizlerdeki tüm parçalarda dört düğümlü tetrahedral elemanlar kullanılmıştır. İdeal eleman boyutunu bulmak için hesaplama süresi verimliliği ile doğruluğunu dengeleyecek şekilde 0,7 mm’lik bir ağ boyutu uygun görülmüştür. Tübüler yapıların malzeme özelliklerinin Ls-Dyna yazılımında tanımlanmasında, *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı kullanılmıştır. Ayrıca, analizlerde hem statik hem de dinamik sürtünme katsayılarının değerleri 0,2 olarak ayarlanmış (Guo et al. 2020) ve üst plakaya ezilme yönünde 1 mm/ms değerinde sabit bir hız uygulanmıştır.



Şekil 3.10. SE modelinin sınır şartları ve ağ elemanı gösterimi

3.2.6. Johnson-Cook malzeme modelinin uygulanması

Öksetik tübüler yapılar elastoplastik malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Deney numunelerinin imalatında kullanılan AISI 304L paslanmaz çelik, yüksek şekil değiştirme hızı duyarlılığı göstermektedir (Sunil and Kapoor 2020; Tuzgel et al. 2022). Bu nedenle, şekil değiştirme oranı etkisini yakalama kapasitesi ile tanınan ve ezilme senaryoları için çok uygun olan Johnson-Cook malzeme modeli seçilmiştir. Johnson-Cook akma gerilmesi (σ), aşağıdaki denklemle tanımlanmaktadır ve malzemeye özgü mekanik özellikler kullanılarak belirlenmektedir (Johnson 1983).

$$\sigma = A + B\epsilon^n \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (3.9)$$

Bu denklemde, A malzemenin akma gerilmesini, B pekleşme modülünü, C şekil değiştirme hızı katsayısını, n pekleşme üssünü ve m termal yumuşama katsayısını temsil etmektedir. Ayrıca, T, T_0 , T_m sırasıyla, malzemenin deformasyon sıcaklığı, referans sıcaklığı ve erime sıcaklığıdır. Aynı denklemde $\dot{\epsilon}$ plastik şekil değiştirme oranını ve $\dot{\epsilon}_0$ referans plastik şekil değiştirme oranını göstermektedir. Bu çalışmada sıcaklık etkileri dikkate alınmadığından, ilgili kısım denklemden çıkarılmıştır. A, B ve n parametrelerini

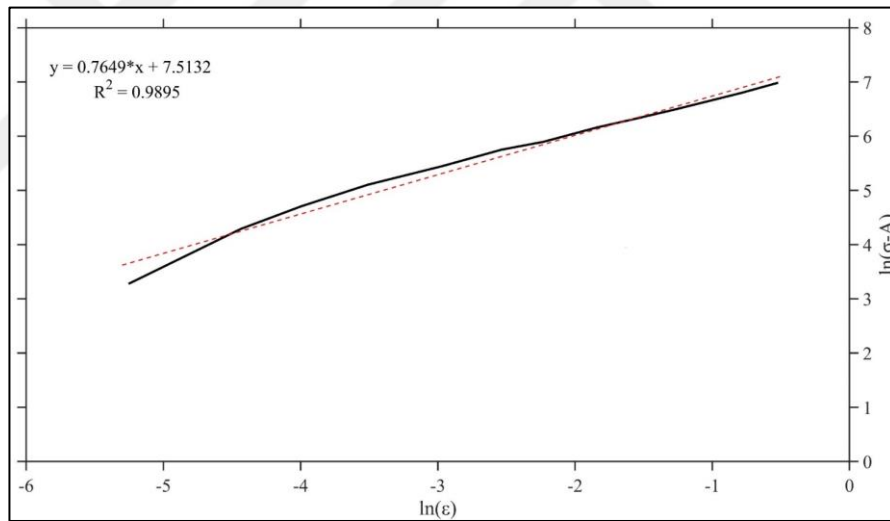
türetmek için denklemin ilk kısmı dikkate alınmış ve ardından denklemin her iki tarafından doğal logaritma alınarak aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\ln(\sigma - A) = n \ln(\epsilon) + \ln(B) \quad (3.10)$$

Johnson-Cook modelinin uydurma eğrisi, Şekil 3.11’da görüldüğü gibi yukarıdaki denklemler vasıtasıyla elde edilmiştir ve hesaplanan malzeme parametreleri Çizelge 3.6’da listelenmiştir. Şekil değiştirme oranı katsayısı (C)’nin değeri 0,125 olarak Taşdemirci et al. (2018) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır.

Çizelge 3.6. Johnson-Cook modeli malzeme parametreleri

A (MPa)	B (MPa)	n	C
221	1833	0,77	0,125



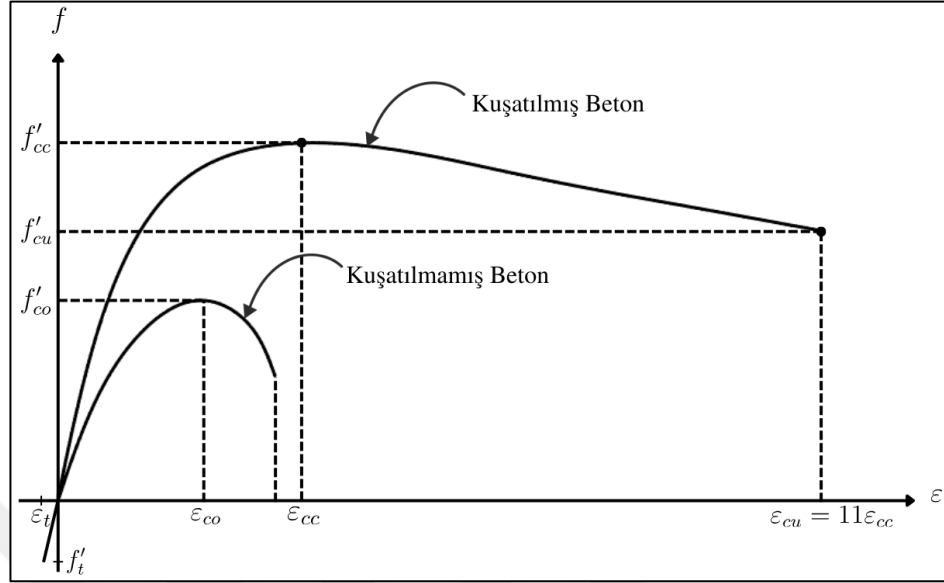
Şekil 3.11. Johnson-Cook modeli eğri uydurması

3.3. Beton Dolgulu Öksetik Tübüler Kompozit Kolonların Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi

3.3.1. Kuşatılmış betonun malzeme özellikleri

Çelik kompozit kolonlarda, kolon eksenel olarak yüklendiğinde beton dolgu yanal olarak genişlemekte ve bu hareket dıştaki çelik tübüler yapı tarafından engellenmektedir.

Bu hareket kısıtlaması, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi betonun mukavemetinde ve sünekliğinde bir artışa neden olmaktadır (Mander et al. 1988; Zhang et al. 2019).



Şekil 3.12. Mander'in gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Mander et al. (1988) çelik tübüler yapıyla kuşatılmış dairesel kesitli betonun basınç dayanımı için aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$f'_{cc} = f'_{co} \cdot \left(-1,254 + 2,245 \cdot \left(\sqrt{1 + 7,94 \cdot \frac{f_{rp}}{f'_{co}}} - 2 \cdot \frac{f_{rp}}{f'_{co}} \right) \right) \quad (3.11)$$

Burada f'_{cc} kuşatılmış betonun basınç dayanımı, f_{rp} kuşatma basıncı ve f'_{co} kuşatılmamış betonun basınç dayanımıdır. Ayrıca f_{cm} betonun basınç dayanımının ortalama değeridir. Hu et al. (2003), deneysel bulguları kullanılarak kuşatma basıncı (f_{rp}) için aşağıdaki şekilde ampirik bir formül önermiştir:

$$f_{rp} = 0,3111 \cdot \left(\frac{D}{t} - 2 \right)^{-1,027} \cdot f_y \quad (3.12)$$

Burada f_y çelik tübülerin akma dayanımı, t çelik tübülerin kalınlığı ve D tübülerin dış çapıdır. Xu et al. (2010) tarafından yapılan çalışma referans alınarak, artık basınç gerilmesi f'_{cu} aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$f'_{cu} = \begin{cases} f'_{cc} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot f_y}{f'_{co}} \right)^{0,1} \rightarrow \frac{D}{t} \leq 40 \\ f'_{cc} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot f_y}{f'_{co}} \right)^{0,1} \cdot \left(\alpha + 1(1 - \alpha) \cdot e^{\left(-\frac{D}{40 \cdot t} - 1 \right)} \right) \rightarrow \frac{D}{t} > 40 \end{cases} \quad (3.13)$$

Burada α ampirik bir parametredir. Hu et al. (2005) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak, artık basınç şekil değiştirmesi ϵ_{cu} ise aşağıdaki formülle bulunabilmektedir:

$$\epsilon_{cu} = 11 \cdot \epsilon_{cc} \quad (3.14)$$

Burada ϵ_{cc} kuşatılmış betondaki basınç şekil değiştirmesidir. Betonun çekme dayanımı f'_t aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$f'_t = 0,56 \cdot (f'_{co})^{0,5} \quad (3.15)$$

Kupfer et al. (1969) tarafından yapılan çalışmaya dayanarak, iki eksenli basınç dayanımı f_{ccb} aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir:

$$f_{ccb} = 1,16 \cdot f'_{cc} \quad (3.16)$$

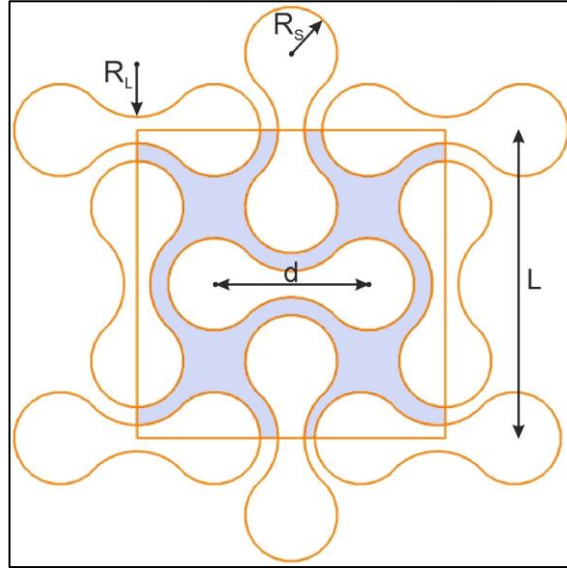
Kedziora and Anwaar (2019) tarafından yapılan çalışma göz önünde bulundurularak, bu çalışmada kullanılan kuşatılmış betonun temel gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin türetilmesinde Drucker-Prager plastisite modeli kullanılmıştır. Drucker-Prager modeli, Drucker ve Prager (1952) tarafından önerilmiştir ve bu model, kaya, toprak ve beton gibi basınca duyarlı malzemeleri başarılı bir şekilde tanımlayabilmektedir. Diğer plastisite modellerine benzer şekilde, bu modelde üç kriter bulunmaktadır (Jiang and Wu 2012). Drucker-Prager modelindeki üç kriter, tek eksenli basınç dayanımı, çift eksenli basınç dayanımı, tek eksenli çekme dayanımı değerleri ve kuşatılmış betonun izotropik malzeme özellikleri, yukarıda açıklanan metodoloji ve Huang et al. (2002) tarafından sunulan deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 3.7'de betonun doğrusal olmayan SEY analizlerinde kullanılan mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kuşatılmış betonun malzeme özellikleri

Drucker-Prager Plastisite Parametreleri			İzotropik Malzeme Parametreleri			
f'_{cc} (MPa)	f'_t (MPa)	f_{ccb} (MPa)	Kuşatılmamış Betonun Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
33,68	2,92	39,07	27,15	24.668	0,2	2.400

3.3.2. Öksetik çelik tübüler yapıların ve kompozit kolonların tasarımı

Öksetik tübüler yapılardaki boşluk şekli, yapının mekanik davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu yapılarda oluşan aşırı gerilme yığılmalarını en aza indirmek ve iyi bir öksetik davranış sağlamak için Wang, H et al. (2020) yer fıstığı şeklindeki birim hücreyi geliştirmişlerdir. Öksetik tübüler yapıları oluşturmak için Şekil 3.13’de geometrik detayları verilen bu yer fıstığı şeklindeki birim hücreler kullanılmıştır. Burada, küçük daire yarıçapı, büyük daire yarıçapı, birim hücre kenar uzunluğu, küçük daireler arasındaki mesafe ve birim hücrenin et kalınlığı sırasıyla R_s , R_L , L , d ve t harfleri ile sembolize edilmiştir.

**Şekil 3.13.** Yer fıstığı şeklindeki öksetik birim hücre

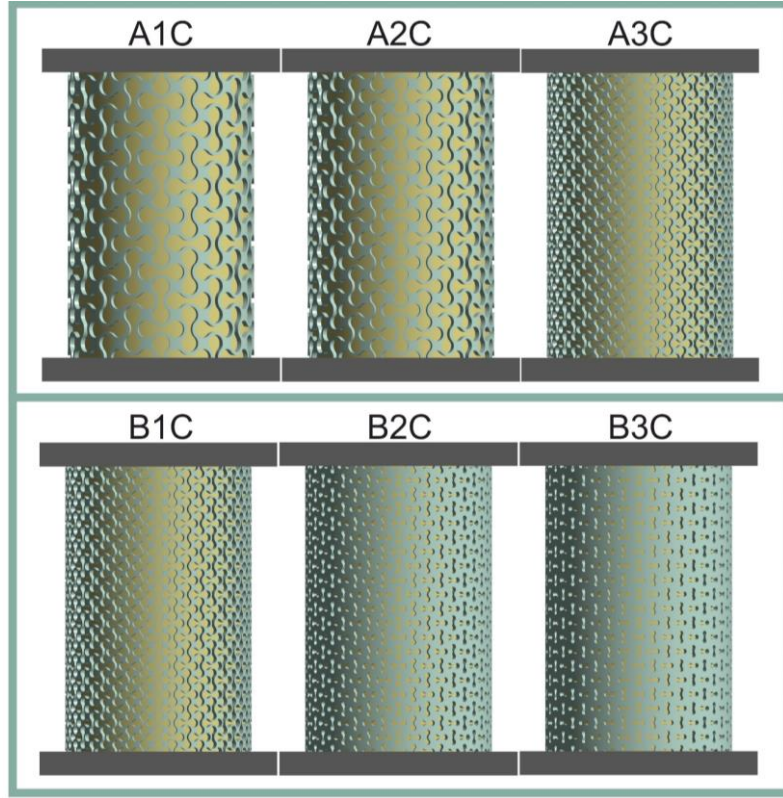
Bu çalışma kapsamında, beş tanesi öksetik ve bir tanesi de geleneksel formda olmak üzere toplam altı farklı kompozit kolon incelenmiştir. İlk olarak aynı porozite ve farklı Poisson oranı değerlerine sahip olacak şekilde üç farklı öksetik tübüler yapı tasarlanmış ve bu yapılarla oluşturulan kompozit kolonlar incelenmiştir. Ayrıca bu

kolonların çelik tübüler kısımlarının hacmi, geleneksel kompozit kolondaki tübüler yapının hacmi ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonrasında, bu yapılardan 30 mm birim hücre uzunluğuna sahip olan tasarım kullanılarak farklı poroziteye sahip ilave iki tübüler yapı tasarlanmış ve böylece porozite etkisi de üç farklı kompozit kolon üzerinden araştırılmıştır. Modellerin isimlendirilmesinde, öksetik çelik tübülerler ve kompozit kolonlar için sırasıyla T ve C harfleri kullanılmıştır. Öksetik tübüler yapıların modellemesinde kullanılan birim hücrelerin geometrik detayları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Öksetik tübüler yapılarda kullanılan birim hücrelerin boyutları

Tübüler	R _s (mm)	R _L (mm)	L (mm)	d (mm)	t (mm)
A1T	9	12	60	30	5
A2T	7,5	10	50	25	5
A3T	4,5	6	30	15	5
B1T	4,5	6	30	15	5
B2T	3	4	30	10	5
B3T	2,5	5	30	8	5

Tüm beton dolgulu öksetik çelik kolonlar (BDÖÇK) SolidWorks 2019 yazılımı kullanılarak 300 mm yükseklik, 195,98 mm dış çap ve 5 mm et kalınlığında tasarlanmıştır. Tüm kolon tipleri 185,98 mm çapında betonla doldurulmuş ve Huang et al. (2002) tarafından yapılan deneysel çalışma dikkate alınarak, beton dolgulu öksetik çelik kolonlar (BDÖÇK) Şekil 3.14’te görüldüğü gibi iki destek plakası arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Çalışma kapsamında incelenen kompozit kolonlar

Betonu çevreleyen çelik tübüler yapıların malzeme özellikleri, Çizelge 3.9’da görüldüğü şekliyle Huang et al. (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmadan alınmıştır. Eksenel olarak yüklenen beton dolgulu çelik kolon, yüksek plastik deformasyona maruz kaldığından, izotropik pekleşme de malzeme özelliklerine dâhil edilmiştir.

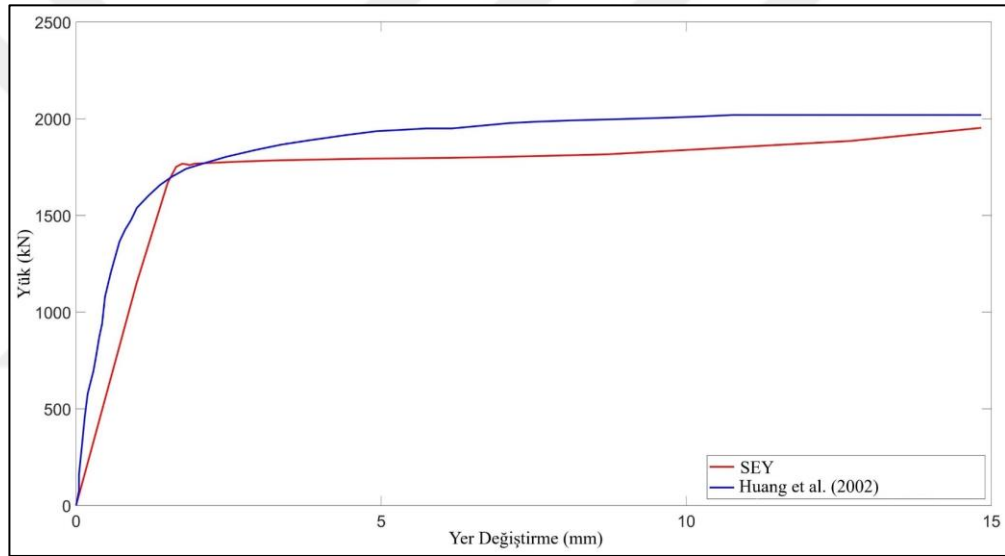
Çizelge 3.9. Çeliğin izotropik malzeme özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
265,8	200	0,3	7.850

3.3.3. Sonlu elemanlar modeli

Çalışma kapsamında ilk olarak, çelik tübüler yapıların Poisson oranları ve direngenlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla analizler yapılmıştır. Bu analizler, yukarıda Bölüm 3.3.2’de verilen detaylar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerin tamamında ANSYS 2022 yazılımının Static Structural analiz modülü kullanılmıştır. Kompozit kolonların analizlerinin doğruluğunun ortaya konması amacıyla öncelikle bir gerçekleştirme çalışması yapılmıştır. Bu amaçla, Huang et al. (2002) tarafından

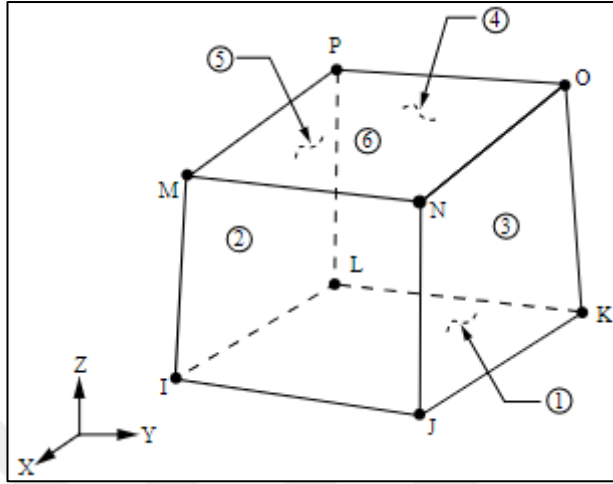
yapılan çalışmada deneysel olarak incelenen geleneksel kompozit bir kolonun sayısal analizi yapılmış ve sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Deneylerde incelenen bu kolon 600 mm yüksekliğe, 200 mm dış çapa ve 5 mm çelik duvar kalınlığına sahiptir. Analiz sonucunda yük-yer değiştirme eğrileri çizilmiş, kolonun nihai basınç dayanımı hesaplanmış ve bulgular Şekil 3.15’de gösterildiği gibi deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. SE analizinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi ile deneyden elde edilen eğrinin uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca deneylerde 2.013 kN olarak bulunan kolonun nihai yük dayanımı, sayısal analiz sonucunda ise %2,98 değerinde küçük bir farkla 1.953 kN olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, kolonların analizinde dikkate alınan sınır şartları aşağıda açıklanmıştır.



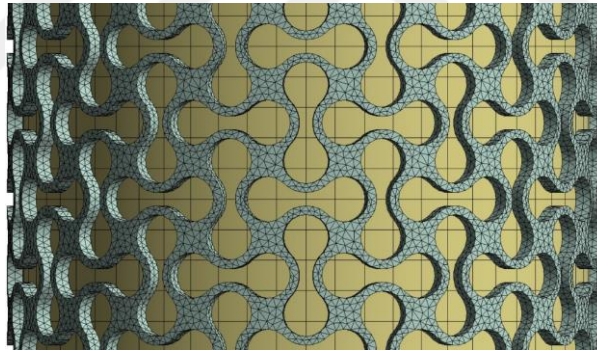
Şekil 3.15. Gerçekleme çalışmasından ve deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri.

Analizlerde beton çekirdek ve destek plakaları için her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğümlü hexahedral elemanlar (Solid185) kullanılmıştır. SOLID185 (hexahedral) elemanı, sekiz düğüm noktasına ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 3.16). Bu eleman, plastisite, hiperelastisite, büyük deformasyonlar ve büyük gerilmeler için uygundur (Anonymous 2013). Tübüler yapılarda ise, karmaşık geometri nedeniyle dört düğümlü tetrahedral elemanlar (Solid285) kullanılmıştır (Şekil 3.2) (Alomarah et al. 2019; Yao et al. 2020). Ağ elemanı boyutu, beton çekirdek için 10 mm, çelik tübüler yapılar için ise 2 mm olarak seçilmiştir (Şekil 3.17). Eleman boyutu belirlenirken, eleman kalitesinin bir göstergesi olan "skewness" parametresi de dikkate alınmıştır. Mevcut ağ yapısı ile optimum ağ

yapısı arasındaki oranı veren parametreye “skewness” denmektedir ve bu parametre 0 ve 1 arasında değerler almaktadır (Anonymous 2013). Skewness değeri sıfıra ne kadar yakın olursa ağ yapısının kalitesi o derece yüksektir ve analizlerde bu değerin 0,2 ile 0,3 arasında kalması sağlanmıştır.

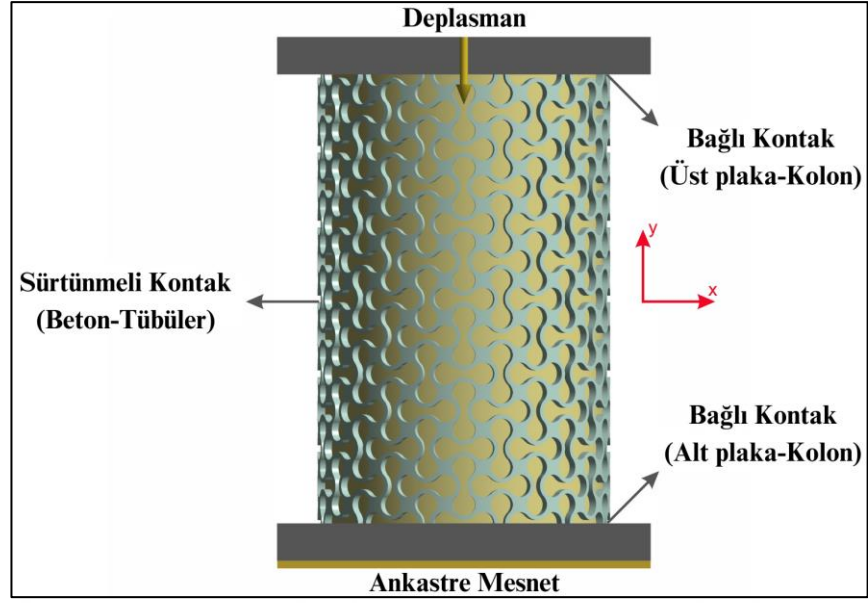


Şekil 3.16. Solid185 ağ elemanı (Anonymous 2013)



Şekil 3.17. Kompozit kolonların sonlu elemanlar modelinin ağ yapısı

Beton ve çelik arasındaki etkileşim, sürtünmeli kontak olarak tanımlanmış ve sürtünme katsayısı, Han et al. (2007) tarafından yapılan çalışma dikkate alınarak 0,6 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, destek plakaları ile çelik boru arasındaki bağlantıyı simüle etmek için “bağlı (bonded)” kontak kullanılmıştır. Eksenel deplasman, kademeli olarak üst plakaya uygulanırken, alt plakanın hareketi tamamen kısıtlanmıştır. Yükleme ve sınır koşulları Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Kompozit kolonların analizinde kullanılan sınır şartları

Analizler sonucunda, kolonların yük-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuş, direngenlik değerleri ve nihai yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Ayrıca, kolonlardaki en yüksek ve ortalama von Mises gerilme dağılımları incelenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Öksetik tübüler yapıların mekanik özelliklerini belirlemek ve farklı uygulamalarını incelemek amacıyla üç farklı başlık altında yapılan çalışmaların sonuçları bu bölümde verilmiştir. İlk bölümde, mühendislik uygulamalarında yer fıstığı şeklindeki yüksek boşluklu öksetik yapıların sınırlamaları dikkate alınarak, birim hücrenin döndürülmesiyle ve berkitici kullanımıyla modifiye edilen yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların sayısal analiz sonuçları verilmiştir. İkinci bölümde, öksetik tübüler yapıların enerji emme yetenekleri üzerinde durulmuştur ve dönen deformasyon mekanizmalarına sahip üç farklı boşluk şekline sahip yapılar ve bu yapıların berkiticiler ile modifiye edilmiş varyasyonlarının yarı-statik ezilme davranışının deneysel ve sayısal sonuçları paylaşılmıştır. Üçüncü bölümde ise, değişken Poisson oranlarına ve poroziteye sahip beton dolgulu öksetik çelik kolonların mekanik özelliklerinin sayısal analiz sonuçları verilmiştir.

4.1. Yer Fıstığı Boşluklu Öksetik Tübüler Yapıların Poisson Oranlarının ve Direngenliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, yer fıstığı şeklinde boşluklara sahip olan on iki farklı tübüler yapının mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizlerin sonuçları sunulmuştur. Bu yapıların simetrik yapısından dolayı sadece tek eksenli Poisson oranları (ν_{ij}) hesaplanmış ve bu değerler, yapıların direngenliği ile birlikte Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu yapılar arasında en yüksek Poisson oranı değeri, döndürülmemiş birim hücreye sahip berkiticili yapıda -0,857 olarak elde edilmiştir. Döndürülmemiş birim hücreye sahip geleneksel yapı ise -0,814 değerindeki Poisson oranı ile geleneksel yer fıstığı şeklindeki yapılar arasında en belirgin öksetik davranışı sergilemiştir. Geleneksel yapıların Poisson oranları, birim hücrenin dönme açısı arttıkça hafif bir düşüş sergilemiştir. Ayrıca yapıların yükleme eksenine aynı doğrultuda yerleştirilen berkiticilerin, Poisson oranı üzerindeki etkisinin dönme açısıyla azaldığı görülmüş ve berkiticili yapılarda da birim hücrenin dönme açısındaki artış daha düşük öksetik davranış ile sonuçlanmıştır. Benzer bulgular Nedoushan et al. (2021) tarafından, berkiticili üç köşeli öksetik yapılar üzerine yapılan çalışmada da belirtilmiştir. Bu araştırmada, birim hücrenin dönme açısındaki artışın üç köşeli öksetik yapılarda daha düşük öksetik

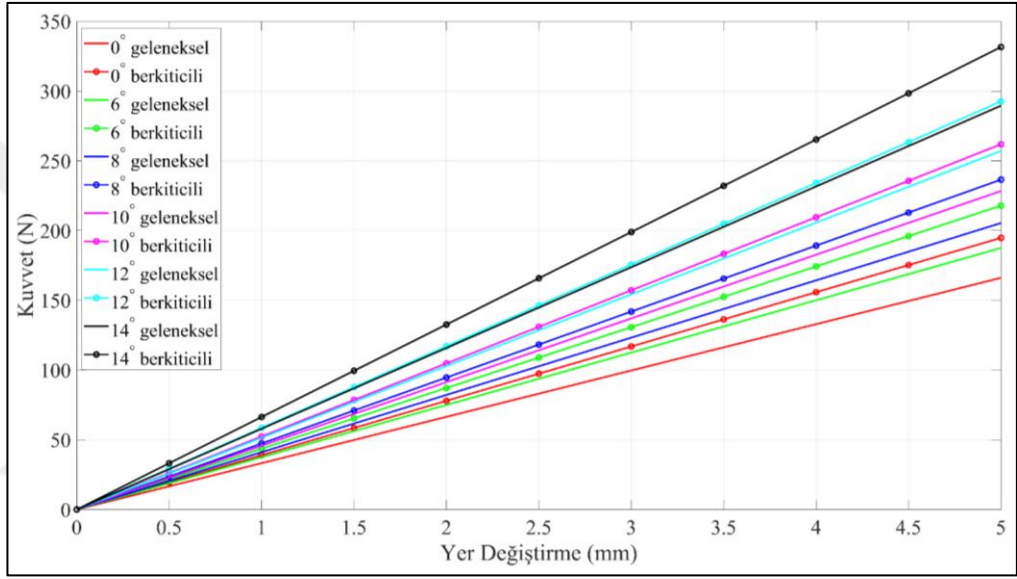
davranışa neden olduğu ifade edilmiştir. Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi, berkitici içeren modeller, berkitici içermeyen muadillerine kıyasla daha yüksek Poisson oranı değerlerine sahiptirler. Birim hücrelerin döndürülmesiyle oluşturulan berkiticili modeller, birim hücrenin döndürülmesiyle oluşturulan geleneksel yapılara kıyasla daha yüksek öksetik davranış göstermiştir.

Çizelge 4.1. Tübüler yapıların analizlerden elde edilen Poisson oranları ve direngenlik değerleri.

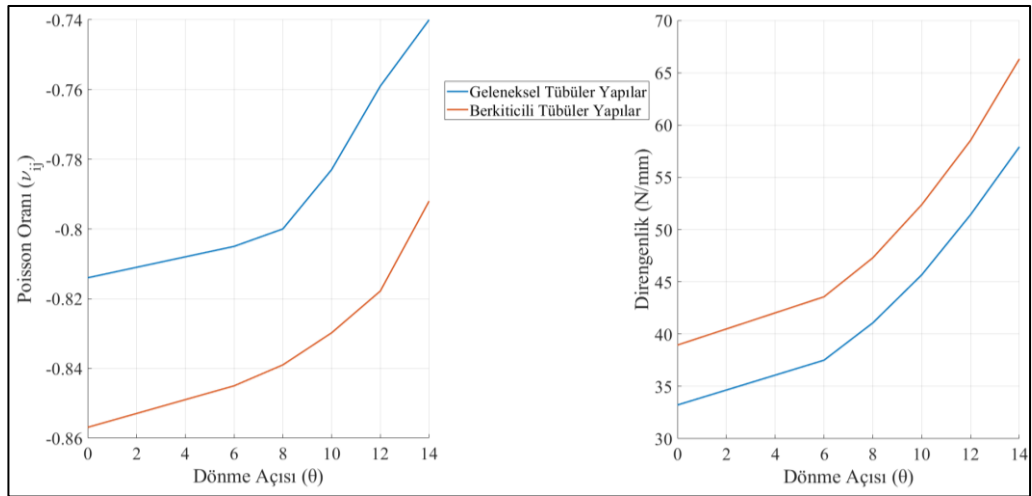
		Birim Hücrenin Dönme Açısı					
	Yapı	0°	6°	8°	10°	12°	14°
Poisson Oranı	Geleneksel	-0,814	-0,804	-0,802	-0,788	-0,751	-0,739
	Berkiticili	-0,857	-0,843	-0,837	-0,829	-0,818	-0,792
Direngenlik (N/mm)	Geleneksel	33,22	37,50	41,07	45,66	51,42	57,90
	Berkiticili	38,95	43,57	47,29	52,37	58,52	66,31

Şekil 4.1’de öksetik tübüler yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri toplu olarak gösterilmiştir. Birim hücrenin 14° döndürüldüğü modellerde tepe kuvvetleri, geleneksel öksetik tübüler yapıda 289,5 N değerine, berkiticili muadilinde ise 331,6 N’a ulaşmıştır. Şekil 4.1’deki her bir eğrinin eğimi doğrudan ilgili yapının direngenlik değeri olarak dikkate alınmıştır. Yapılardaki boşlukların hareketini kısıtlayan berkiticilerin eklenmesi yapıların direngenliğinin artmasına neden olmuştur. 0,5 mm kalınlığındaki berkiticilerin eklenmesiyle yapıların direngenliğinde %14,5 ila %17,2 arasında bir artış sağlanmıştır. En yüksek direngenlik değerleri hem geleneksel hem de berkiticili yapılarda birim hücrenin 14° döndürüldüğü modellerde elde edilmiş ve sırasıyla 57,90 N/mm ve 66,31 N/mm olarak bulunmuştur. Birim hücrenin dönüş açısının artırılması da hem geleneksel hem de berkiticili öksetik tübüler yapılarda direngenlik değerlerini arttırmıştır. Bu sonuç, yapının porozitesi değiştirilmeden, birim hücrenin belirli bir açıyla döndürülmesiyle daha yüksek direngenliğe sahip yapılar elde edilebileceğini göstermektedir. Poisson oranlarının ve direngenlik değerlerinin hem geleneksel hem de berkiticili tübüler yapılarda dönme açısı ile değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Berkiticilerin eklenmesiyle yapılar daha yüksek bir öksetik davranış gösterirken direngenlik değerleri de artmıştır. Bununla birlikte yapının porozitesi değişmeden birim hücrenin döndürülmesiyle, yapının öksetik davranışı azalma eğilimi göstermektedir. Geleneksel öksetik tübüler

yapılar -0,814 ila -0,739 arasında değişen Poisson oranı değerlerine sahipken, berkiticili tübüler yapıların Poisson oranı ise -0,857 ila -0,792 aralığında değişim göstermiştir. Berkiticilerin eklenmesi, geleneksel tübüler öksetiklerin Poisson oranında %5,3 ila %7,2 arasında bir artış sağlamıştır. Yer fıstığı boşluklu öksetik yapılar, basma etkisi altında dönme şeklinde bir deformasyon mekanizmasına sahiptirler. Tübüler yapılar, eksenel yönde yüklenirken dönme mekanizmalarına berkiticilerin pozitif bir katkı sağladığı görülmektedir ve berkiticili modellerde daha yüksek öksetik davranış elde edilmesinin nedeninin bu durum olduğu düşünülmektedir.

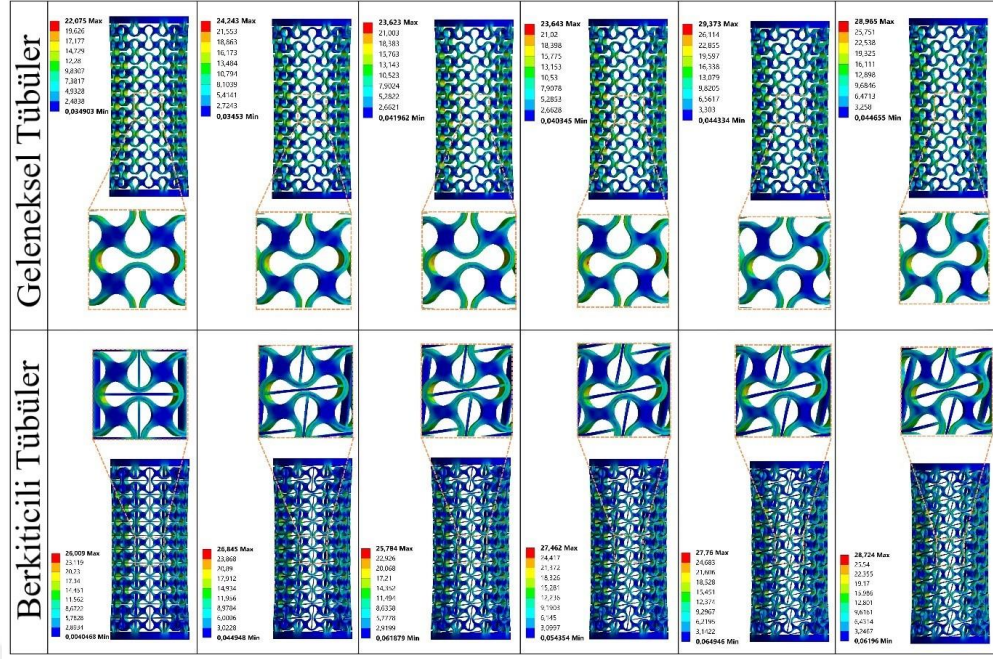


Şekil 4.1. Tübüler öksetik yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri

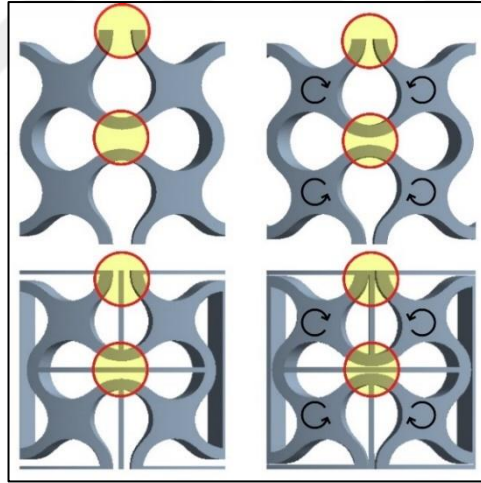


Şekil 4.2. Öksetik yapıların Poisson oranı ve direngenlik değerlerinin birim hücrenin dönüş açısıyla değişimi.

Şekil 4.3’de, yapılardaki von Mises gerilme dağılımı ve birim hücrelerdeki bölgesel deformasyonlar gösterilmiştir. Modellere uygulanan 5 mm’lik yer değiştirme boyunca tüm modellerin öksetik davranış sergilediği deformasyon şekillerinden görülmektedir. Deformasyon yapısı, yapının merkezindeki dairesel kesitin basınç nedeniyle içe doğru büzüldüğünü ortaya koymaktadır ki bu da negatif Poisson oranının açık bir göstergesidir. Oluşan bu deformasyon, Şekil 4.4’te gösterildiği gibi yer fıstığı şeklindeki birim hücrenin basınç etkisinde merkezleri etrafında dönen parçalarının hareketinin bir sonucudur. En yüksek gerilme yığılmaları da bu parçaların birleşim noktalarında gözlemlenirken, en düşük gerilmeler tüm öksetik modellerde gövdenin merkez hattı civarında meydana gelmiştir. Yapılarda elde edilen bu gerilme dağılımlarının, Wongchai (2021) tarafından yapılan ve yer fıstığı şeklinde boşluklardan oluşan öksetik yapıların incelendiği çalışma ile Zhang et al. (2022) tarafından yapılan, dönen kare şekilli öksetik yapıların mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmadan elde edilen bulgularla da uyumlu olduğu görülmüştür. Hem dikey hem de yatay olarak yerleştirilmiş berkiticiler, birim hücredeki parçaların dönüşünü sınırlayarak yapıların direngenliğini ve yapılarda oluşan en büyük gerilme değerlerini arttırmıştır. Ayrıca, birim hücrelerin 0° , 6° , 8° ve 10° döndürülmesiyle oluşturulan modellerde, berkitici içeren yapıların, geleneksel muadillerine göre daha yüksek gerilme yığılmalarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Bu sonuçların, Nedoushan and Yu (2020) tarafından gerçekleştirilen ve eliptik boşluklardan oluşmuş geleneksel ve berkiticili öksetik yapıların mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmanın sonuçlarıyla da uyumlu olduğu görülmüştür.



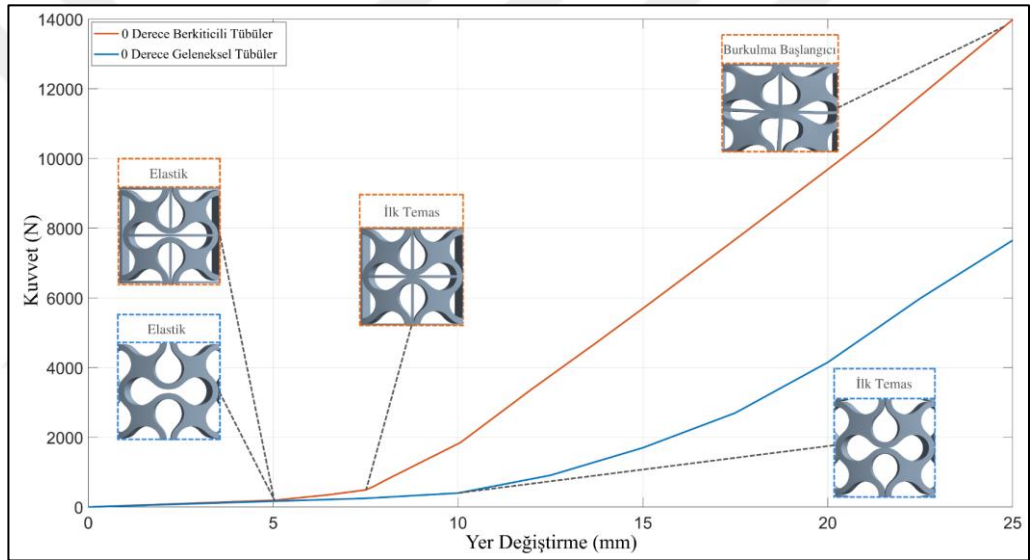
Şekil 4.3. Öksetik tübüler yapılarıdaki von Mises gerilme dağılımları ve bu yapıların deformasyon modları.



Şekil 4.4. Yer fıstığı şeklindeki birim hücrelerin 5 mm basınç altındaki deformasyon modları.

Söz konusu berkiticilerin, dâhil edildikleri öksetik yapıların mekanik özelliklerini etkilemede baskın bir rol oynadıkları elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bununla birlikte hem geleneksel hem de berkiticili modellerde yer fıstığı şeklindeki boşlukların iç yüzeylerinin birbirine temas etmediği ve berkiticilerde gözle görülür bir burkulmanın olmadığı Şekil 4.3'ten anlaşılmaktadır. Yüzeylerdeki bu temas oluşumunun ve berkiticilerde meydana gelebilecek burkulmaların incelenmesi amacıyla birim hücrenin döndürülmediği geleneksel ve berkiticili öksetik modeller dikkate alınarak daha büyük

bir deplasman değerinde (25 mm) doğrusal olmayan ilave analizler yapılmıştır. Şekil 4.5’de bu analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve birim hücrelerin anlık deformasyon görüntüleri birlikte sunulmuştur. Bu analizler sonucunda, geleneksel modeldeki boşlukların iç yüzeylerinin 10 mm’lik bir yer değiştirme anında temas etmeye başladığı belirlenmiştir. Berkiticili modelde ise bu temasın, berkiticinin etkisiyle, 8 mm’lik yer değiştirme değeriyle birlikte başladığı gözlemlenmiştir. Boşlukların iç yüzeylerinin birbirine temas ettiği anda, yapıların hem kuvvet hem de direngenlik değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, yer değiştirmenin 25 mm değerine ulaşmasıyla, döndürülmemiş berkiticili yapıdaki berkiticinin burkulmaya başladığı belirlenmiştir.

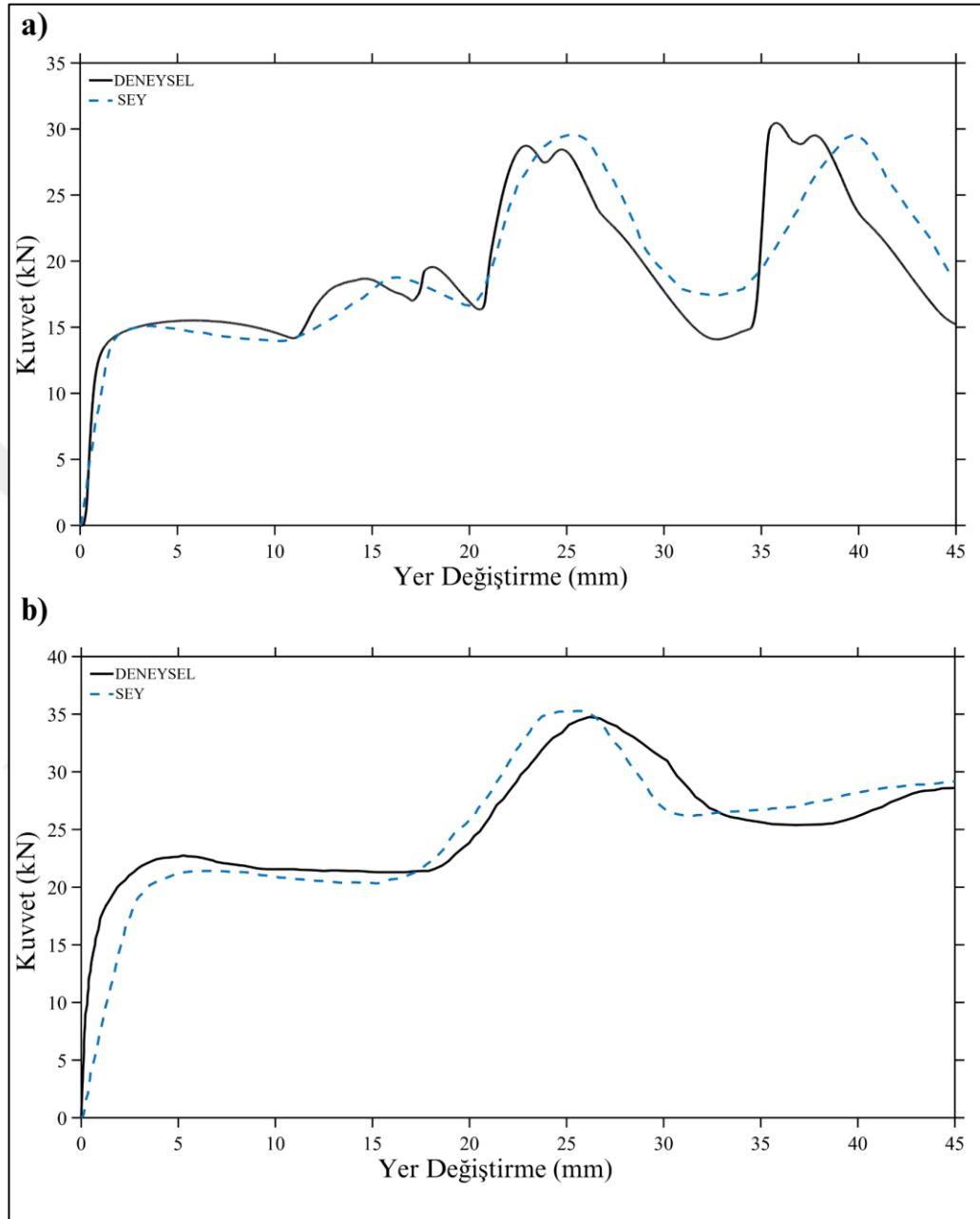


Şekil 4.5. Döndürülmemiş geleneksel ve berkiticili modellerin anlık deformasyon görüntüleri ile kuvvet-yer değiştirme eğrileri.

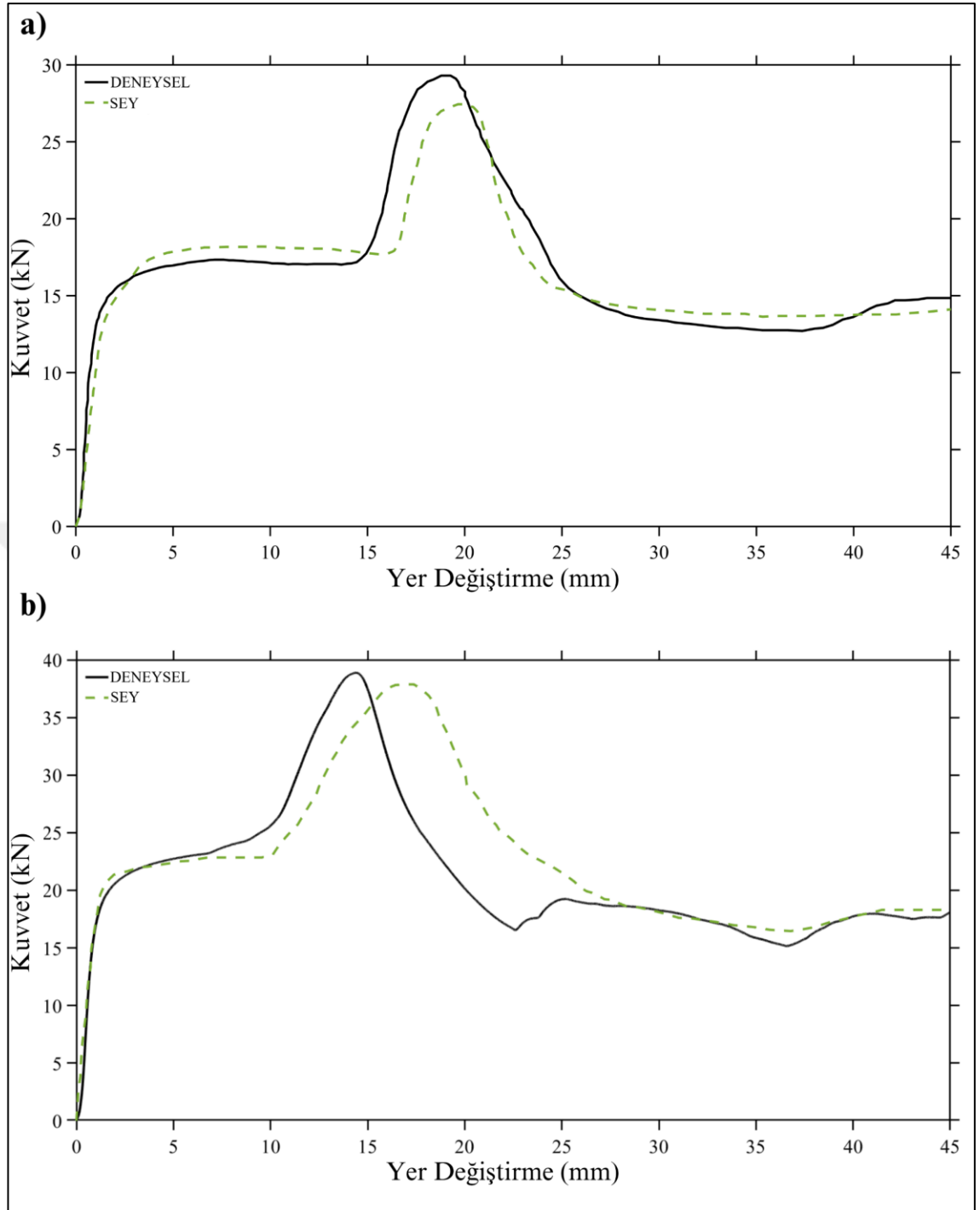
4.2. Öksetik Tübül Yapıların Ezilme Davranışı

Bu bölümde, öksetik tübül yapıların ezilme etkisindeki davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerin ve sayısal analizlerin sonuçları sunulmuştur. Boşluk şekli ve berkiticinin öksetik tübül yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için öncelikle yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.6-4.8’de deneylerden ve analizlerden elde edilen bu eğriler verilmiştir. Deneyler her bir farklı yapı için beş kez tekrar edildiğinden, yük-yer değiştirme eğrilerinin oluşturulmasında deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması

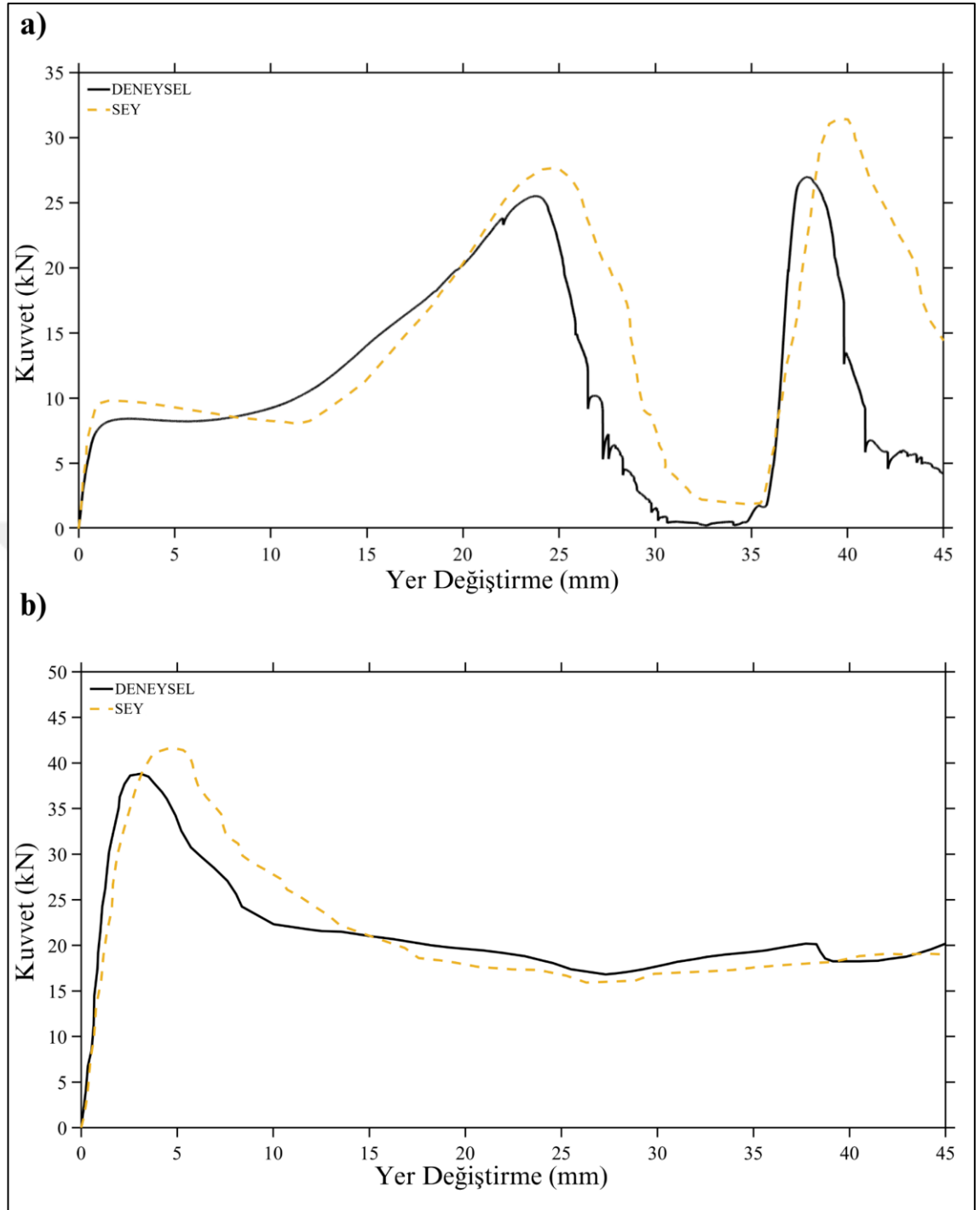
dikkate alınmıştır. Yapıların deformasyon aşamalarının deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen görüntüleri ise Şekil 4.9-4.11’de sunulmuştur.



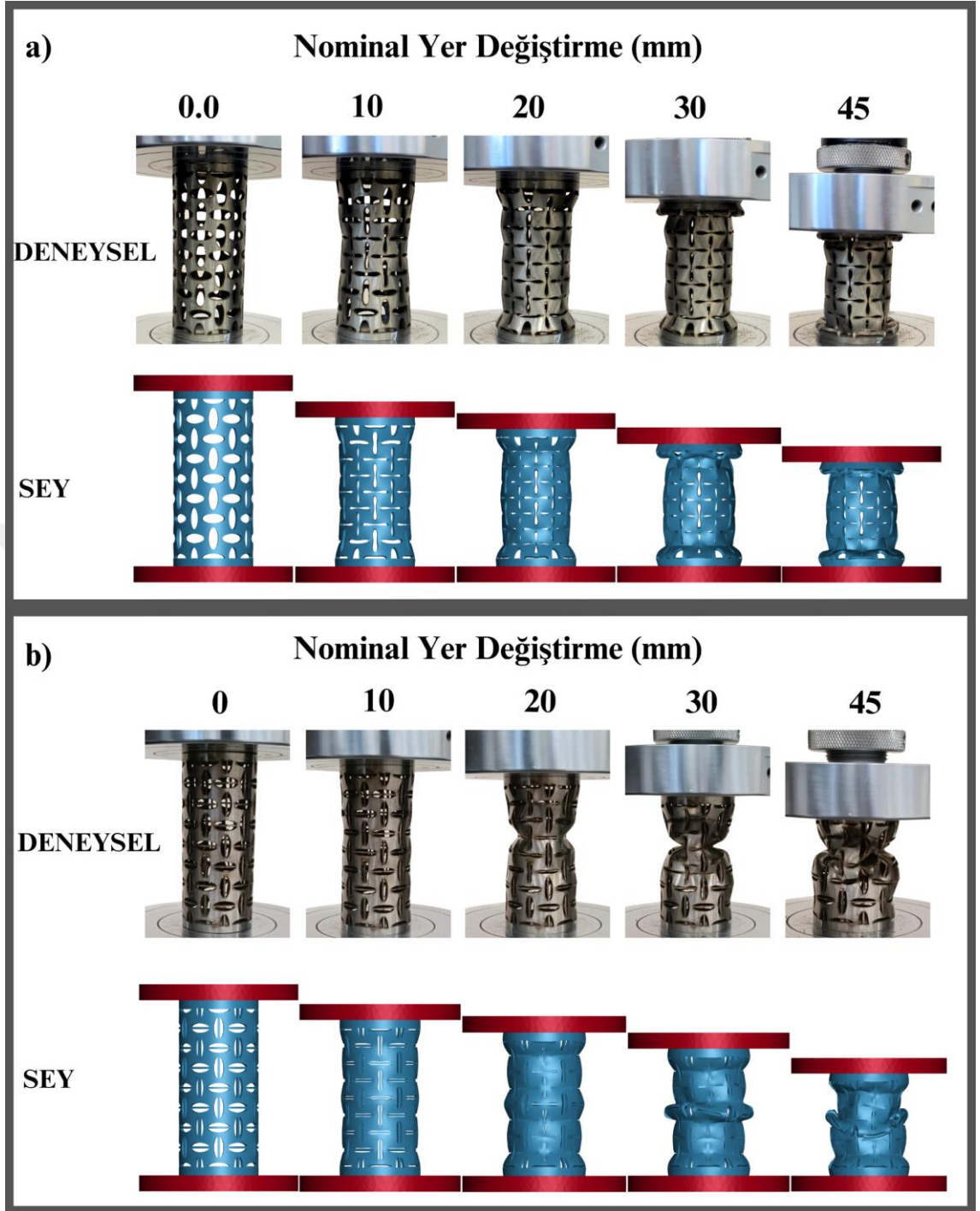
Şekil 4.6. Eliptik boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GE, (b) BE.



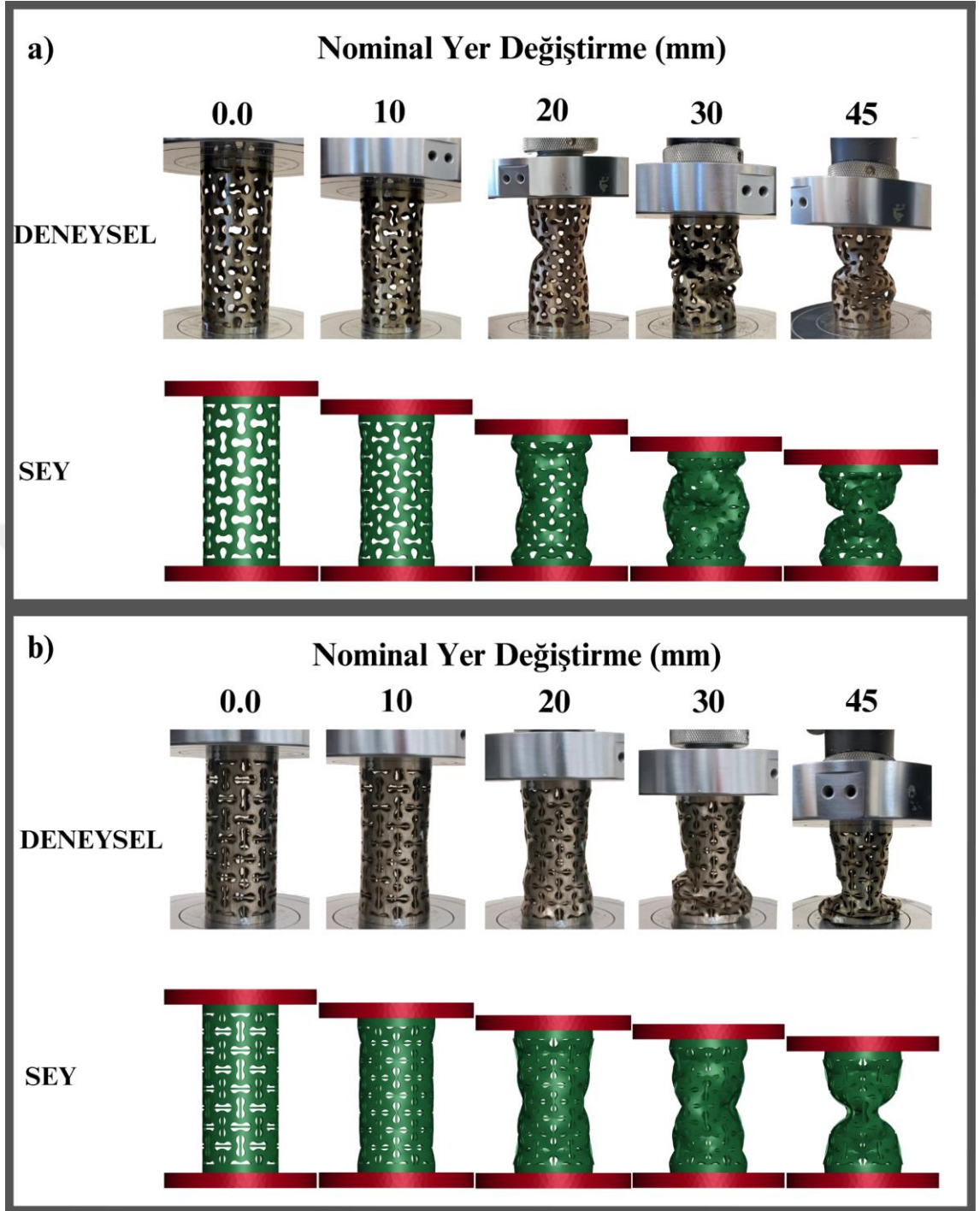
Şekil 4.7. Yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GF, (b) BF.



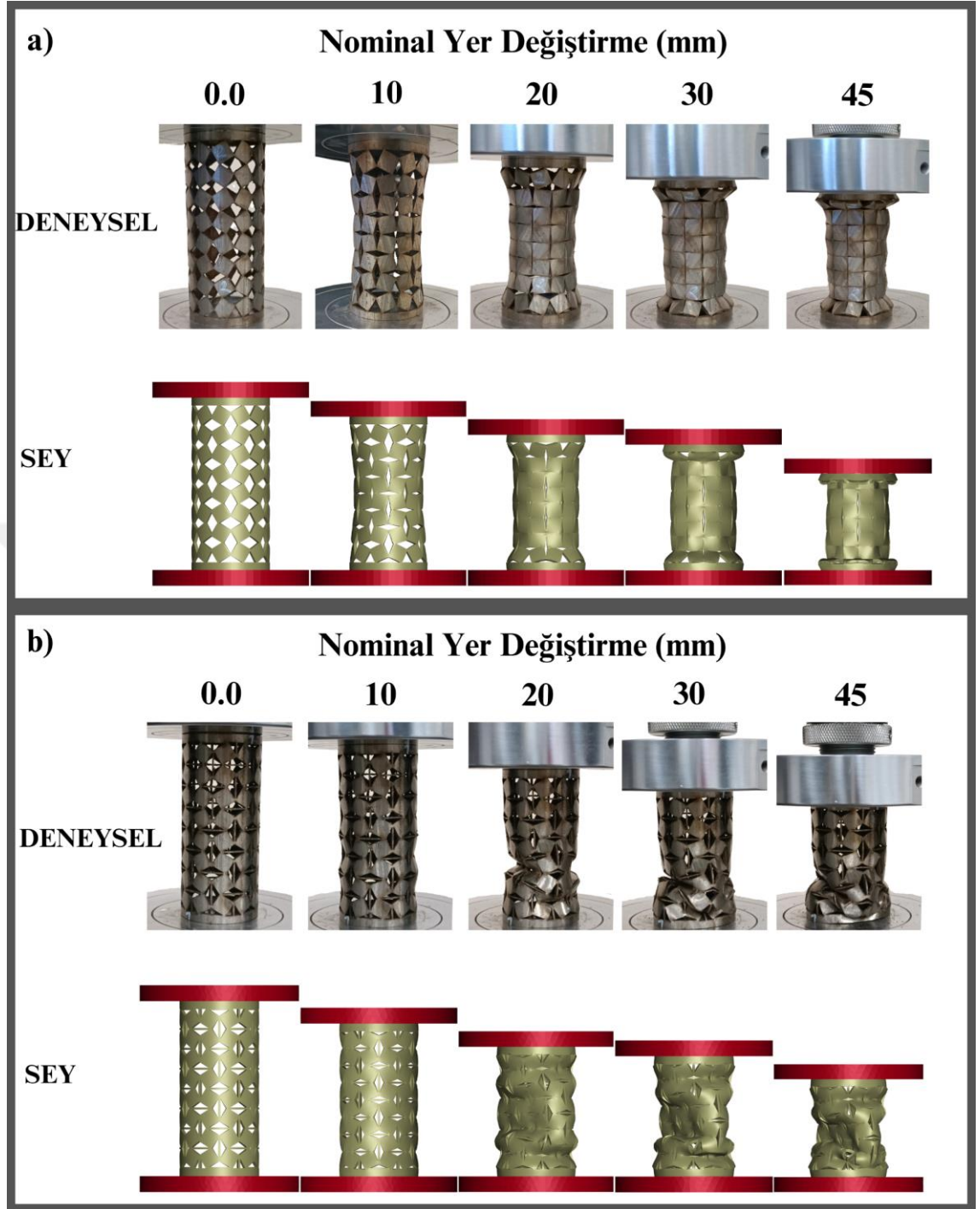
Şekil 4.8. Kare boşluklu tübüler yapıların deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri: (a) GK, (b) BK.



Şekil 4.9. Eliptik boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GE, (b) BE



Şekil 4.10. Yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GF, (b) BF



Şekil 4.11. Kare boşluklu tübüler yapıların deformasyon modları: (a) GK, (b) BK

Şekil 4.6 (a)'da görülebileceği üzere, yer değiştirme değeri 3,8 mm olduğunda GE yapısındaki eliptik boşluklar çökmeye başlamıştır ve bu noktada 15,55 kN değerinde ilk tepe ezilme kuvveti meydana gelmiştir. Bu yapıda ilk olarak orta kısım büzülmeyle başlamış ve yer değiştirme değeri 11,2 mm'ye ulaştığında boşlukların iç yüzeyleri arasında ilk temas meydana gelmiştir. Bu temasın etkisiyle ezilme kuvvetinde bir artış meydana gelmiştir. Bu noktadan sonra GE yapısının üst bölgesi yerel olarak deforme

olmaya başlamış ve bu aşamada öncelikle, parçaların sıkışmasına bağlı olarak 31,42 kN değerindeki en büyük kuvvet elde edilmiştir. Sonrasında, eliptik boşlukların birleşim noktalarında kırıkların oluşmasına bağlı olarak kuvvette keskin bir düşüş gözlemlenmiştir. Benzer deformasyonlar bu yapıların alt bölgelerinde de meydana gelmiştir. Sonuç olarak, GE tübüler yapıları simetrik deformasyona uğramış ve Şekil 4.9 (a)'da görüldüğü gibi biri üstte diğeri altta olmak üzere iki farklı kat oluşturmuştur. Elde edilen bu sonuçlar, eliptik tübüler yapıların mekanik davranışını inceleyen farklı literatür çalışmalarının bulgularıyla da benzerlik göstermektedir (Huo et al. 2022; Logakannan et al. 2022). GF yapılarının Şekil 4.7 (a)'da verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, boşluklarda göçme başladığında 15,46 kN'luk bir ilk tepe ezilme kuvveti olduğu görülmektedir. Bu aşamadan sonra, eliptik modellere kıyasla yer fıstığı şeklindeki boşluklarda birleşme noktalarının daha geniş olması nedeniyle deformasyonlar eliptik modellerdeki kadar düzgün ve simetrik ilerlememiştir. Yer fıstığı şeklindeki boşluklar yatay eksenleri boyunca içe doğru kayarak tübüler yapının yüzeyinde zayıf noktaların oluşmasına neden olmuştur. Bu içe doğru kaymalar sonucunda oluşan yığılmalarla kuvvette bir artış gözlemlenmiş ve yer değiştirme değeri 16,4 mm olduğunda en büyük kuvvet değeri olan 29,25 kN'a ulaşılmıştır. Daha sonra bu yapının orta kısımlarında içe doğru yerel burkulmalar gerçekleşmiş ve kuvvet değerinde keskin bir düşüş meydana gelmiştir. Son aşamada, yapının katlanmış bölümleri üst üste binerek yapı içindeki boşlukları doldurmuş ve bu durum Şekil 4.10 (a)'da görüldüğü gibi 40,2 mm'den sonra kuvvet değerinde bir artışa neden olmuştur. GK yapılarının deformasyon eğiliminin ise genel olarak GE yapısına benzediği görülmüştür. Bu yapılardaki ilk tepe ezilme kuvveti, kare boşlukların çökmeye başlamasıyla 8,08 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 4.8 (a)). Kare parçalar kendi merkezleri etrafında dönerek, GE yapısında gözlemlenen davranışa benzer şekilde, tübüler yapının merkez bölgesinde büzülmelere neden olmuşlardır. 13,1 mm'lik yer değiştirme anında kare deliklerin iç kenarları ilk kez birbirlerine temas etmiştir ve bu anda kuvvet değerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra, GK yapısının üst kısmında Şekil 4.11 (a)'da görüldüğü gibi yerel deformasyonlar oluşmaya başlamış ve böylece üst bölümdeki kare parçaların birleşim noktalarında kırılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu kırılmaların etkisiyle kuvvet-yer değiştirme eğrisinde dalgalanmalar meydana gelmiş ve yük değeri keskin bir şekilde 2 kN'a kadar düşmüştür. Yapıda meydana gelen kırılmalar sonrasında, kare parçaların üst üste yığılmasıyla yük değeri tekrar artış eğilimine girmiş ve 26,74 kN'luk en büyük ezilme kuvveti bu aşamada elde edilmiştir. Yarı-statik ezilme testinin sonunda GK

numuneleri simetrik bir deformasyon karakteri sergilemiş ve yapıların alt ve üst kısımlarında iki kat oluşmuştur.

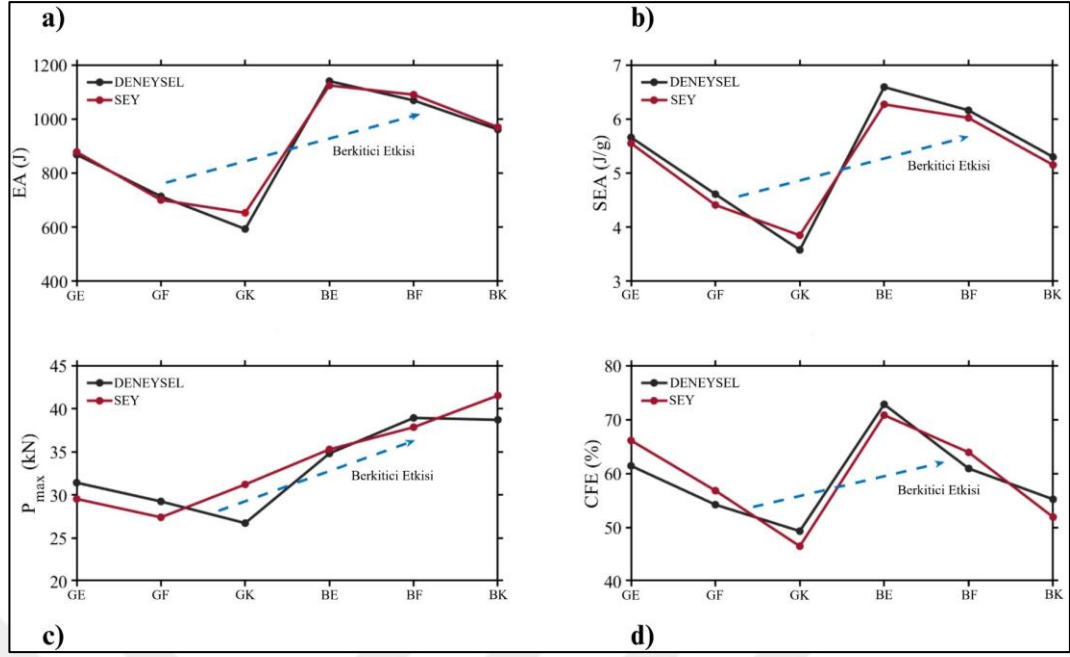
Şekil 4.6 (b)'de görülebileceği üzere BE yapılarındaki eliptik boşlukların çökmesi, berkiticilerin varlığı nedeniyle yer değiştirmenin 2,6 mm olmasıyla başlamış ve ilk tepe kuvveti 22,59 kN olarak elde edilmiştir. Berkiticiler, eliptik boşlukların bağlantı noktalarını güçlendirdiğinden, BE öksetik yapısı yatay berkiticilerin bulunduğu bölgelerde büzülmeye başlamıştır. Yer değiştirme değeri 18,5 mm olduğunda bu yapıların merkezine yakın bölgelerde asimetrik deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu deformasyonlar, yer değiştirmeye değeri 26,1 mm olana kadar devam etmiş ve 34,81 kN değerindeki en büyük kuvvet değerine ulaşılmasını sağlamıştır. Dikey berkiticiler yüksek eğilme momentlerine maruz kaldıklarından, yapıya uygulanan basınç yüküne dayanamamışlar ve Şekil 4.9 (b)'de gösterildiği gibi deforme olmuşlardır. Berkiticilerde görülen bu davranış, Günaydın et al. (2019) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Bu aşamada yük değeri azalmaya başlamış ve bu azalma 35 mm'lik yer değiştirmeye kadar devam etmiştir. Bu noktada, yapının içindeki boşluklar kapandığından ve parçalar arasında temas başladığından kuvvet tekrar artmaya başlamıştır. BF yapısı incelendiğinde, yer fıstığı şeklindeki deliklerin 1,5 mm'lik yer değiştirme anında çökmeye başladığı ve bu anda Şekil 4.7 (b)'de görüldüğü gibi 20,83 kN değerindeki ilk tepe kuvvetinin oluştuğu görülmektedir. Berkiticilerin varlığı nedeniyle yer fıstığı şekilli boşluklardaki yüzeyler, deformasyon sürecinin henüz başlarında birbirlerine temas etmeye başlamışlardır. Bu temas, 8,9 mm değerindeki yer değiştirmede meydana gelmiş ve ezilme kuvvetinde hızlı bir artışa neden olmuştur. Berkiticiler, 38,93 kN değerindeki yüke kadar aksenal basınç etkisine dayanmışlardır ve böylece, bu yapıların yüksek direngenlik ve yapısal stabilite sergilemesini sağlamışlardır. BE yapısında gözlemlenen davranışa benzer şekilde, bu yapılarda da ilk olarak yatay berkiticilerin bulunduğu bölgelerde büzülme başlamış ve Şekil 4.10 (b)'de gösterildiği gibi yapıların alt kısmında yerel deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu asimetrik deformasyon ilk olarak ezilme kuvvetinde bir azalmaya neden olmuş ve sonrasında, 41,2 mm'lik yer değiştirme anında başlayan yığılmalarla kuvvet tekrar artış eğilimi sergilemiştir. Şekil 4.8 (b)'de kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilen BK yapıları incelendiğinde ise, yapıdaki kare parçaların hareketinin berkiticiler ile büyük ölçüde kısıtlandığı ve böylece ilk tepe noktasında 38,71 kN'luk en büyük ezilme kuvvet değerine

ulaşıldığı görülmüştür. Bu yapılardaki berkiticiler 4,5 mm'lik yer değiştirmeye kadar aksinel yüklere dayanmış ve daha sonra yatay berkiticilerin konumlandırıldığı bölgelerde yerel burkulmalar meydana gelmeye başlamıştır. Bu yapıların alt bölgelerinde yerel deformasyonların oluştuğu görülmüştür ve bu deformasyonlar devam ettikçe ezilme kuvvetinde belirgin bir değişim olmamıştır. Ayrıca berkiticiler kare parçaların birleşim noktalarını güçlendirdiğinden, Şekil 4.11 (b)'de gösterildiği gibi GK yapılarında gözlemlenen davranışın aksine herhangi bir kırılma tespit edilmemiştir.

Deformasyon karakteristikleri yukarıda açıklanan öksetik tübüler yapıların ezilme etkisine dayanıklılığını detaylı bir şekilde analiz etmek için, Bölüm 3.2.4'te özetlenen performans değerlendirme metriklerini içeren karşılaştırmalı bir çalışma yürütülmüştür. İlk olarak, ilgili kuvvet-yer değiştirme eğrileri yarı-statik ezilme yüklemesi altında hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle elde edilmiştir. Bu verilere dayanarak performans değerlendirme parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 4.2'de toplu olarak sunulmuştur. Ayrıca, tübüler yapıların toplam enerji emme kapasitesi, özgül enerji emme kapasitesi, en büyük ezilme kuvveti ve ezilme kuvveti verimliliği değerlerinin deneylerden ve sayısal analizlerde elde edilen sonuçlarla grafiksel olarak karşılaştırması Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Öksetik tübüler yapılarının performans değerlendirme parametre sonuçları

Modeller	Çalışma Tipi	Kütle (g)	P_{max} (kN)	$P_{initial}$ (kN)	EA (J)	SEA (J/g)	MCF (kN)	CFE (%)
GE	Deneysel	153,38	31,42	15,55	868,26	5,66	19,29	61,4
	Sayısal	158,11	29,54	14,78	878,07	5,55	19,51	66,1
	Hata (%)	2,9	6,4	5,2	1,1	1,9	1,3	7,1
GF	Deneysel	154,91	29,25	15,46	713,92	4,61	15,86	54,2
	Sayısal	159,01	27,41	17,79	700,39	4,41	15,56	56,8
	Hata (%)	2,6	6,7	13,1	1,9	4,5	1,9	4,6
GK	Deneysel	165,42	26,74	8,08	593,41	3,58	13,18	49,3
	Sayısal	169,61	31,22	9,59	653,12	3,85	14,51	46,5
	Hata (%)	2,5	14,3	15,7	9,1	7,1	9,2	6,1
BE	Deneysel	172,88	34,81	22,59	1139,96	6,59	25,33	72,8
	Sayısal	179,21	35,28	21,06	1123,92	6,27	24,97	70,8
	Hata (%)	3,5	1,3	7,2	1,4	5,1	1,4	2,8
BF	Deneysel	173,49	38,93	20,83	1068,62	6,16	23,74	60,9
	Sayısal	180,81	37,85	21,63	1089,85	6,02	24,22	63,9
	Hata (%)	4,1	2,9	3,7	1,9	2,3	1,9	4,7
BK	Deneysel	181,24	38,71	38,71	961,14	5,30	21,36	55,2
	Sayısal	188,32	41,52	41,52	969,88	5,15	21,55	51,9
	Hata (%)	3,8	6,7	6,7	0,9	2,9	0,9	6,4



Şekil 4.12. Öksetik tübüler yapıların performans değerlendirme parametrelerinin karşılaştırılması: (a) EA, (b) SEA, (c) P_{max} , (d) CFE.

Öncelikle Şekil 4.6-4.12 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde, hem kuvvet-yer değiştirme eğrileri hem de dikkate alınan performans ölçütleri bağlamında sayısal analiz sonuçları ile deneysel bulgular arasında yüksek derecede bir uyum olduğu görülmektedir. Ayrıca, ortaya konan sayısal modelin yerel burkulma ve kırılmalar da dâhil olmak üzere deformasyon modlarını yakalama kabiliyetinin yüksek olduğu görülebilmektedir. Elde edilen bu bulgular sayısal modelin doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Performans değerlendirme parametrelerinin deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlarına göre berkiticili öksetik modellerin geleneksel muadillerine kıyasla ezilme etkisinde daha iyi davranış sergiledikleri anlaşılmaktadır. Yapıların toplam enerji emme kapasiteleri (EA) incelendiğinde, berkiticili modellerin tüm geleneksel muadillerini geride bırakarak daha yüksek enerji emilimi sergilediği görülmüştür. BE modeli, 1139,96 J değeriyle tüm yapılar arasında en yüksek toplam enerji emilimine sahipken, berkiticili modeller arasında en düşük toplam enerji emilimine sahip olan BK modeli (961,14 J) tüm geleneksel yapılardan daha iyi performans göstererek berkiticilerin yapıların ezilme davranışı üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir. Berkiticili tübüler modellerden BE ve BF, özgül enerji emilimi (SEA) açısından geleneksel modellerden daha iyi performans sergilemiş, BK modeli ise sadece GE geleneksel yapısının gerisinde kalmıştır. GK modeli ise geleneksel yapılar arasında 3,58 J/g değeri ile en düşük SEA'ya

sahip olmuştur (Şekil 4.12 (b)). Şekil 4.12 (c)'de görüldüğü gibi, berkiticili modeller geleneksel modellere kıyasla daha yüksek en büyük ezilme kuvveti (P_{max}) değerlerine sahip olmuşlardır. Geleneksel modeller arasında GE en yüksek en büyük ezilme kuvvetine sahipken (31,42 kN), ikinci sırada 29,25 kN değeri ile BF modeli yer almıştır. Berkiticili yapılar arasındaki BF ve BK modelleri, en büyük ezilme kuvveti açısından benzer performanslar sergilediği ve bu kuvvet değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Ezilme kuvveti verimliliği (CFE) dikkate alındığında, geleneksel modeller arasında GE'nin uygulanan ezilme kuvvetinin yaklaşık %61,4'ünün etkin bir şekilde emildiğini işaret eden en yüksek CFE değerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.12 (d)). GF modeli %54,2 değerindeki CFE ile GE'den biraz daha düşük olsa da benzer bir performans sergilemiştir. GK modelinin ise %49,3 ile geleneksel modeller arasında en düşük CFE değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, BE modeli sahip olduğu %72,8'lik CFE değeri ile tüm yapılar arasında ilk sırada yer almıştır. BK modeli, berkiticili yapılar arasında en düşük CFE'ye sahip olmasına rağmen, GE dışındaki geleneksel modellerden daha iyi performans göstermiştir. Bu bulgular berkiticilerin, tübüler öksetik yapıların ezilme kuvvetlerine karşı dayanımını ve bu kuvvetleri absorbe etme kapasitesini geliştirmede ki önemini göstermektedir.

Özetle hem tübüler yapıdaki boşluk şeklinin hem de berkitici varlığının bu yapıların ezilmeye dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Eliptikten kareye doğru boşluk şekillerindeki geçiş, genel olarak performans değerlendirme metriklerinde bir düşüşe karşılık gelmiştir. Yerel burkulma ve kırılmaların olmadığı eliptik boşluklara sahip tübüler yapılar plastik deformasyon nedeniyle yüksek enerji emilimi sergilemişlerdir. Berkiticilerin yapılara dâhil edilmesi ise yapıların ezilmeye karşı dayanıklılık özelliklerinde belirgin bir iyileşmeye yol açmıştır. Ayrıca, berkiticilere sahip olan bu yapılar, köşe noktalarda oluşan bükülmelere ve dönmelere bağlı olarak benzer deformasyon mekanizmaları sergilemişlerdir.

4.3. Beton Dolgulu Öksetik Tübüler Kompozit Kolonların Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi

Bu bölümde, yer fıstığı boşluklu farklı öksetik tübüler yapılar kullanılarak oluşturulan beton dolgulu çelik kompozit kolonların aksenal basınç altındaki

davranışlarının incelenmesi ve geleneksel kompozit kolonlarla karşılaştırılması için yapılan analizlerin sonuçları sunulmuştur. Öksetik tübüler yapıların Poisson oranları ve poroziteleri ana değişkenler olarak belirlenmiş ve bu parametrelerin kolonların mekanik davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, sadece Poisson oranının kolonların mekanik davranışı üzerindeki doğrudan etkisini araştırmak için tübüler yapıların poroziteleri değiştirilmeden farklı Poisson oranlarına sahip modeller tasarlanmıştır. Aynı poroziteye ve farklı negatif Poisson oranına sahip modeller elde etmek için farklı geometrik parametreler (R_s , R_L , L , d) kullanılmıştır. Birim hücre uzunlukları 30, 50 ve 60 mm olan öksetik tübüler yapılar oluşturulmuş ve bu yapıların porozitesi %65,5 olarak ayarlanmıştır. Bu yapıların Poisson oranları (ν_{xy}), modellerin merkezinin en dış noktalarından alınan verilerle Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.3). En büyük birim hücreye sahip olan A3T modelinin en yüksek Poisson oranına, A1T modelinin ise en düşük Poisson oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, yapının birim hücresinin boyutu arttıkça öksetik davranışın azaldığını göstermektedir.

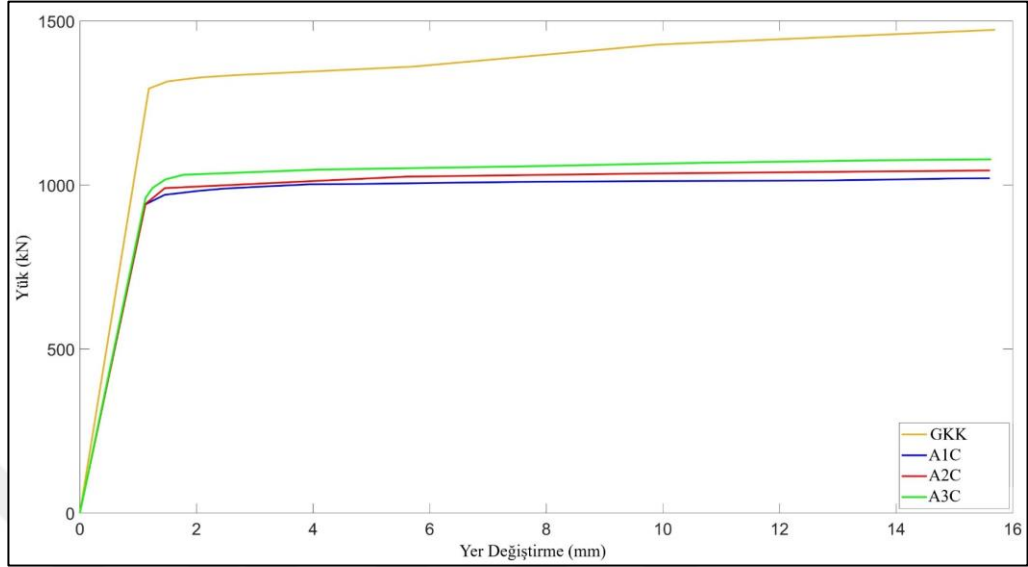
$$\nu_{xy} = -\frac{\text{yanal \u0131ekil de\u011fi\u013ftirme}}{\text{eksenel \u0131ekil de\u011fi\u013ftirme}} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.3. Öksetik tübüler yapılardaki birim hücre uzunluğu ile bu yapıların porozite, Poisson oranı ve direngenlik değerleri.

Modeller	L (mm)	Porozite	Poisson Oranı	Direngenlik (kN/mm)
A1T	60	0,655	-0,8308	8,6
A2T	50	0,655	-0,8492	8,6
A3T	30	0,655	-0,8601	8,6

Şekil 4.13, aynı malzeme özelliklerine, yükleme-sınır koşullarına ve farklı Poisson oranlarına sahip öksetik kompozit kolonların ve geleneksel kompozit kolonun (GKK) sayısal analizlerinden elde edilen yük-yer de\u011fi\u013ftirme eğrilerini göstermektedir. Bu eğriler incelendiğinde, öksetik davranış ile kolonun yük taşıma kapasitesi arasında doğrudan bir ilişki olduğu görülmektedir. Öksetik kolonlar arasında en büyük nihai yük 1.078,4 kN ile A3C modelinde, en düşük nihai yük ise 1.037,7 kN ile A1C modelinde elde edilmiştir. A2C modelinin nihai yük değeri ise 1.044,5 kN olarak bulunmuştur. Bunula birlikte, öksetik kompozit kolonlarla aynı boyutlardaki GKK, kıyaslanan

modeller arasındaki en iyi davranışı sergilemiş ve 1.473,3 kN ile en yüksek nihai yük değerine sahip olmuştur.



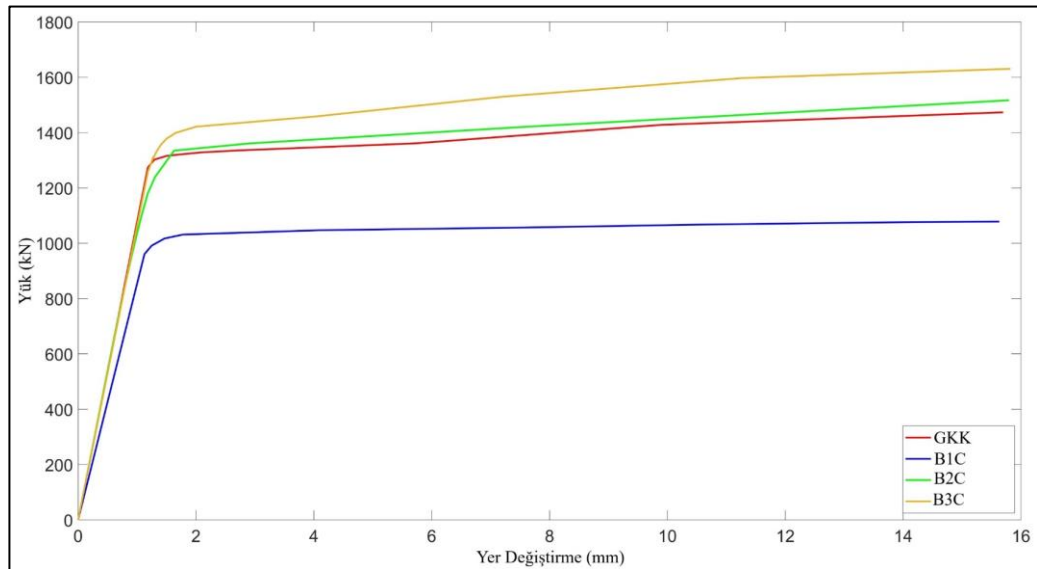
Şekil 4.13. A1C, A2C, A3C ve GKK modellerin yük-yer değiştirme eğrileri

Bu sonuçlardan, tübüler yapının öksetik davranışı arttıkça, kolonun yük taşıma kapasitesinin de arttığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, öksetik tübüler yapılardaki boşluklar, öksetik kompozit kolonların direngenliğini olumsuz yönde etkilemekte ve dolayısıyla bu kolonlar geleneksel muadillerinden daha düşük bir performans sergilemektedirler. Bu direngenlik değerinin, öksetik kolonların yapısal performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi için, aynı poroziteye sahip öksetik kolonlar arasında en iyi performansı sergileyen A3C modeli üzerinden parametrik bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, 30 mm değerinde birim hücre uzunluğuna sahip öksetik tübüler model, birim hücre uzunluğu (L) değiştirilmeden diğer geometrik parametreler (R_s , R_L , d) kullanılarak farklı porozite değerlerine ve dolayısıyla direngenliğe sahip olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan öksetik tübüler modellerin sayısal analizleri gerçekleştirilmiş ve yük-yer değiştirme eğrileri ile birlikte Poisson oranları ve direngenlikleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.4). Yer fıstığı şeklindeki birim hücrenin oluşturulmasında kullanılan iki daire arasındaki mesafe (d) azaldıkça, birim hücre içerisindeki boşluk azalmakta ve dolayısıyla yapı daha düşük poroziteye sahip olmaktadır. Tübüler yapıların porozitesinin azalmasıyla da yapının öksetik davranışı azalmakta ve direngenliği ise artmaktadır. Oluşturulan modeller arasında, B3T modeli en büyük direngenlik değerine sahipken en düşük öksetik davranışı sergilemiştir.

Çizelge 4.4. Kompozit kolonlarda kullanılan öksetik yapıların Poisson oranı ve direngenlik değerleri.

Yapı Adı	L (mm)	d (mm)	Porozite	Poisson Oranı	Direngenlik (kN/mm)
B1T	30	15	0,655	-0,8601	8,6
B2T	30	10	0,293	-0,3215	427,5
B3T	30	8	0,216	-0,1021	802,2
GKK	-	-	-	-	391,8

Şekil 4.14’te, farklı poroziteye sahip tübüler yapılarla oluşturulan kompozit kolonların ve geleneksel kolonun sayısal analizlerinde elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. En düşük öksetik davranışı gösteren tübüler yapının (B3T) kullanıldığı B3C modelinin 1.630,7 kN ile en yüksek nihai yüke sahip olduğu görülmüştür. B2C modelinin nihai yük değeri ise 1.516,9 kN olarak elde edilmiştir. Azalan porozite ve artan direngenlikle birlikte öksetik kompozit kolonların dayanımı artmış ve B3C modelinin nihai yükü geleneksel kompozit kolondan daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar Poisson oranının, değişen poroziteye sahip modellerin nihai yükü üzerindeki etkisinin baskın olmadığını göstermektedir. Özetle, yüksek porozite düşük direngenliğe ve yüksek öksetik davranışa neden olurken, düşük direngenlik nihai yükteki azalmada birincil faktör olarak gözükmemektedir.

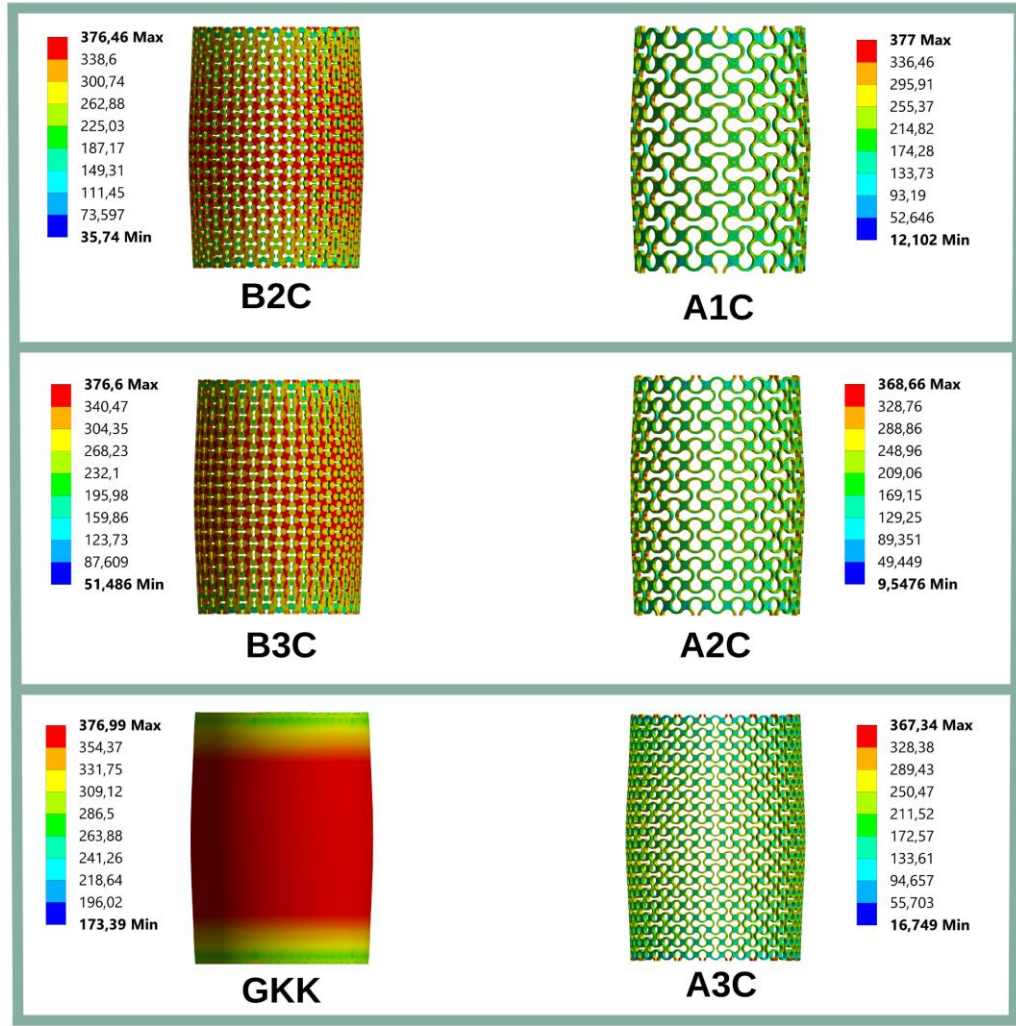
**Şekil 4.14.** B1C, B2C, B3C ve GKK yük-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Yapılan sayısal analizlerden yola çıkılarak, kompozit kolonların deformasyon modları ve gerilme dağılımları da incelenmiştir. Kompozit kolonlarda eksenel basınç

altında belirlenen en büyük ve ortalama von Mises gerilme değerleri Çizelge 4.5'te verilmiş ve kolonlardaki von Mises gerilme dağılımları toplu olarak Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Pozitif Poisson oranına sahip olan beton, aksenal basınç altında enine genişleme eğilimindedir ve negatif Poisson oranına sahip çelik tübüler yapılar bu genişlemeyi bir dereceye kadar engellemektedir. Yükleme tamamlandığında ise betonun genişleme eğilimi baskın olmakta ve bu durum öksetik tübüler yapılarda da enine genişlemeye neden olmaktadır. Bu genişlemenin bir sonucu olarak, tüm öksetik yapılarda yer fistığı şeklindeki boşlukların etrafında 367,34 MPa ile 377 MPa arasında değişen değerlerde yüksek gerilmelerin olduğu görülmektedir. A1C, A2C ve A3C modellerindeki çelik tübüler yapılarda ortalama von Mises gerilmeleri birbirine yakınken, B1C, B2C ve B3C kolonlarında bu ortalama gerilme değeri porozite ile birlikte artmıştır.

Çizelge 4.5. Kompozit kolonlarda oluşan von Mises gerilme değerleri

von Mises Gerilmesi (MPa)		A1C	A2C	A3C	B1C	B2C	B3C	GKK
Ortalama	Çelik	210,6	208,9	212,3	212,3	297,7	301,1	357,3
En Büyük	Çelik	377	368,7	367,3	367,3	376,5	376,6	377



Şekil 4.15. Kompozit kolonlardaki tübüler yapılarda oluşan von Mises gerilme dağılımları.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, öksetik tübüler yapıların mekanik özellikleri üç farklı araştırma alanı kapsamında incelenmiştir. İlk bölümde, son zamanlarda araştırmacıların giderek artan bir ilgi gösterdiği yer fıstığı boşluklu tübüler öksetiklerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ansys/Static Structural yazılımında gerçekleştirilen analizlerde, birim hücrenin döndürülmesi ve birim hücrelere berkitici eklenmesinin bu yapıların direngenliği ve öksetikliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci bölümde, benzer şekil değiştirme mekanizmalarına sahip olan eliptik, yer fıstığı ve kare şekilli boşluklardan oluşan tübüler yapıların ezilme davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. AISI 304L paslanmaz çelikten boru lazer kesim yöntemiyle üretilen numuneler yarı-statik basınç testine tabi tutulmuş ve analizleri ANSYS/Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirilmiştir. Yapıların enerji emme kapasiteleri farklı parametreler üzerinden incelenmiş ve böylece farklı uygulama alanlarında potansiyel kullanımları için ihtiyaç duyulan özellikleri ortaya konmuştur. Son bölümde ise tübüler öksetiklerin inşaat mühendisliği alanında kullanılabilirliği üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, farklı Poisson oranı ve poroziteye sahip yer fıstığı boşluklu tübüler yapıların beton dolgulu çelik kompozit kolonlarda kullanımı araştırılmıştır. Öksetik tübülerle oluşturulan bu kolonların basınç etkisindeki davranışı Ansys/Static Structural yazılımında yapılan analizlerle incelenmiş ve geleneksel kompozit kolonların davranışıyla karşılaştırılmıştır. Bu üç başlık altında yapılan incelemelerle, öksetik yapıların mühendislik uygulamalarındaki potansiyelinin ve çok yönlülüğünün anlaşılmasına katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

Yer fıstığı boşluklu öksetik tübüler yapılarının mekanik özelliklerine ilişkin elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Hem geleneksel hem de berkiticili yer fıstığı şeklindeki boşluklara sahip tübüler yapılarda, birim hücrenin dönme açısı arttıkça Poisson oranının azaldığı belirlenmiştir.
- Dönme açısı arttıkça yapıların direngenlikleri de artmıştır. Bu özellik, yapının geometrik parametrelerini veya porozitesini değiştirmeden sadece birim hücrenin döndürülmesiyle direngenliğinin ayarlanabilmesine imkân

vermektedir. Berkiticilere sahip yer fıstığı şeklindeki yapılar, bu parçalar sayesinde en büyük dönme açılarında en yüksek direngenliği göstermişlerdir.

- Berkiticiler kullanıldığında modellerin porozitesi %14,4 azalmıştır. Bu durumda üretim maliyeti artacaktır ancak, elde edilen yüksek öksetiklik ve direngenlik ile bu dezavantajın telafi edilebileceği düşünülmektedir.
- Berkiticilerin kullanılması ve dönme açısının büyümesiyle yapıların yük taşıma kapasiteleri de artmıştır. Ayrıca, tüm modellerde en büyük von Mises gerilmelerinin yer fıstığı şekilli boşlukların etrafında olduğu gözlemlenmiştir.
- Eliptik, yer fıstığı ve kare boşluklu öksetik tübüler yapıların ezilme etkisi altındaki davranışlarına ilişkin sonuçlar aşağıda sunulmuştur.
- Öksetik yapılarda, eliptik boşluklardan kare boşluklara geçişin temel performans ölçütlerini etkilediği görülmüştür. Eliptik boşluklarla oluşturulan tübüler yapılar (BE, GE) enerji emilimi için en yüksek kapasiteyi sergilerken, kare boşluklu öksetikler (BK, GK) hem geleneksel hem de berkiticili yapılarda en düşük enerji emme seviyelerini göstermiştir.
- Berkiticilerin eklenmesi öksetik tübüler yapıların ezilme dayanıklılığını arttırmıştır. Berkiticili modeller (BE, BF, BK), geleneksel muadilleriyle (GE, GF, GK) karşılaştırıldığında toplam enerji emilimi, özgül enerji emilimi ve en büyük ezilme kuvvetleri açısından daha üstün performans sergilemiştir. İncelenen öksetik yapılar arasında BE yapısı en iyi performansı sergilerken BK yapısı ise en düşük performansı göstermiştir.
- Oluşturulan sayısal modelin deneysel sonuçlarla kapsamlı bir şekilde doğrulanması, bu çalışmada kullanılan yaklaşımın güvenilirliğini ve doğruluğunu ortaya koymuştur. Bu sayısal model, kuvvet-yer değiştirme eğrileri, deformasyon modları ve şekil değiştirme mekanizmaları dahil olmak üzere kritik özellikleri başarıyla yakalamıştır.
- Farklı Poisson oranı ve poroziteye sahip öksetik tübüler yapıların kullanıldığı beton dolgulu çelik kompozit kolonların yük taşıma kapasitesi üzerine yapılan analizlerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir.
- Beton dolgulu çelik kompozit kolonların mekanik davranışı, önerilen sonlu elemanlar modeliyle, yüksek doğrulukla ve düşük hesaplama süresiyle tahmin edilebilmektedir.

- Aynı poroziteye sahip öksetik tübülerlerin Poisson oranları, tübülerlerin beton çekirdeği üzerindeki kuşatma etkileri Poisson oranlarıyla orantılı olduğundan, kolonların nihai yük taşıma kapasitesi üzerinde belirli bir deplasman değerine kadar önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla yüksek öksetikliğe sahip çelik tübüler kompozit kolonlar daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur.
- Değişken parametre olarak tübüler yapıların porozitesinin dikkate alınması durumunda kolon davranışı üzerindeki belirleyici faktör olarak Poisson oranının yerini direngenlik almaktadır. Değişken poroziteye sahip öksetik tübüler yapılar incelendiğinde, yüksek porozitenin düşük direngenliğe ve dolayısıyla kompozit kolonların taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Porozitenin azalması ise öksetik yapıların direngenliği ve kolonların yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.
- Çelik tübüler kısımları aynı hacime sahip olan öksetik ve geleneksel kolonlar yük taşıma kapasiteleri bakımından karşılaştırıldığında, geleneksel kompozit kolonun daha yüksek kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, öksetik tübüler yapılar üzerinde yapılacak parametrik ve topoloji optimizasyonu çalışmalarıyla, geleneksel kompozit kolonlardan daha üstün mekanik davranış gösterebilecek yeni öksetik yapıların ortaya konabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Alderson, A., Alderson, K. L., Chirima, G., Ravirala, N. and Zied, K. M. 2010a. The in-plane linear elastic constants and out-of-plane bending of 3-coordinated ligament and cylinder-ligament honeycombs. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1034-1041.
- Alderson, A., Alderson, K. L., Attard, D., Evans, K. E., Gatt, R., Grima, J. N., Miller, W., Ravirala, N., Smith, C. W. and Zied, K. 2010b. Elastic constants of 3-, 4-and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1042-1048.
- Alderson, A., Rasburn, J., Ameer-Beg, S., Mullarkey, P. G., Perrie, W. and Evans, K. E. 2000. An auxetic filter: a tuneable filter displaying enhanced size selectivity or defouling properties. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39(3), 654-665.
- Alderson, A., Rasburn, J. and Evans, K. E. 2007. Mass transport properties of auxetic (negative Poisson's ratio) foams. *Physica Status Solidi (b)*, 244(3), 817-827.
- Alderson, A., Rasburn, J., Evans, K. E. and Grima, J. N. 2001. Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties. *Membrane Technology*, 2001(137), 6-8.
- Alderson, K. L., Simkins, V. R., Coenen, V. L., Davies, P. J., Alderson, A. and Evans, K. E. 2005. How to make auxetic fibre reinforced composites. *Physica Status Solidi (b)*, 242(3), 509-518.
- Allen, T., Hewage, T., Newton-Mann, C., Wang, W., Duncan, O. and Alderson, A. 2017. Fabrication of auxetic foam sheets for sports applications. *Physica Status Solidi (b)*, 254(12), 1700596.
- Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S. and Gao, Z. 2019. Compressive properties of a novel additively manufactured 3D auxetic structure. *Smart Materials and Structures*, 28(8), 085019.
- Amin, F., Ali, M. N., Ansari, U., Mir, M., Minhas, M. A. and Shahid, W. 2015. Auxetic coronary stent endoprosthesis: Fabrication and structural analysis. *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 13(2), 127-135.
- Anandan, S., Hussein, R. M., Spratt, M., Newkirk, J., Chandrashekhara, K., Misak, H. and Walker, M. 2019. Failure in metal honeycombs manufactured by selective laser melting of 304 L stainless steel under compression. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(2), 114-122.
- Anonymous. 2013. Ansys mechanical APDL theory reference (Ansys Release 15.0), Ansys Inc, Canonsburg, PA, USA.
- Arago, D. F. J. 1854. *Oeuvres Comple`tes*, D'Apres Son Ordre Sous La Direction, 671, France.

- ASTM A269/A269M-15a – Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service, 2015, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2004, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Attard, D., Casha, A. R. and Grima, J. N. 2018. Filtration properties of auxetics with rotating rigid units. *Materials*, 11(5), 725.
- Bai, Z., Sun, K., Zhu, F., Cao, L., Hu, J., Chou, C. C. and Jiang, B. 2018. Crashworthiness optimal design of a new extruded octagonal multi-cell tube under dynamic axial impact. *International Journal of Vehicle Safety*, 10(1), 40-57.
- Baran, T. and Öztürk, M. 2020. In-plane elasticity of a strengthened re-entrant honeycomb cell. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 83, 104037.
- Barchiesi, E., Spagnuolo, M. and Placidi, L. 2019. Mechanical metamaterials: a state of the art. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 24(1), 212-234.
- Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A. G. 2017. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*, 118, 137-163.
- Chen, Q. and Pugno, N. M. 2012. In-plane elastic buckling of hierarchical honeycomb materials. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 34, 120-129.
- Chen, Y. and Fu, M. H. 2017. A novel three-dimensional auxetic lattice meta-material with enhanced stiffness. *Smart Materials and Structures*, 26(10), 105029.
- Chen, Z., Wu, X., Xie, Y. M., Wang, Z. and Zhou, S. 2020. Re-entrant auxetic lattices with enhanced stiffness: a numerical study. *International Journal of Mechanical Sciences*, 178, 105619.
- Chetcuti, E., Ellul, B., Manicaro, E., Brincat, J. P., Attard, D., Gatt, R. and Grima, J. N. 2014. Modeling auxetic foams through semi-rigid rotating triangles. *Physica Status Solidi (b)*, 251(2), 297-306.
- Choi, J. B. and Lakes, R. S. 1992. Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio. *Journal of Materials Science*, 27, 5375-5381.
- Duncan, O., Foster, L., Senior, T., Alderson, A. and Allen, T. 2016. Quasi-static characterisation and impact testing of auxetic foam for sports safety applications. *Smart Materials and Structures*, 25(5), 054014.
- Duncan, O., Shepherd, T., Moroney, C., Foster, L., Venkatraman, P. D., Winwood, K., Allen, T. and Alderson, A. 2018. Review of auxetic materials for sports applications: Expanding options in comfort and protection. *Applied Sciences*, 8(6), 941.

- El-baky, M. A. A., Allah, M. M. A., Kamel, M. and Abdel-Aziem, W. 2023. Fabrication of glass/jute hybrid composite over wrapped aluminum cylinders: an advanced material for automotive applications. *Fibers and Polymers*, 24(1), 143-155.
- En, B. S. (2004). 1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Evans, K. E. and Alderson, A. 2000. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!. *Advanced Materials*, 12(9), 617-628.
- Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J. and Rogers, S. C. 1991. Molecular network design. *Nature*, 353(6340), 124-124.
- Faraci, D., Driemeier, L. and Comi, C. 2021. Bending-dominated auxetic materials for wearable protective devices against impact. *Journal of Dynamic Behaviour of Materials*, 7, 425-435.
- Feng, R., Tang, J. P., Quach, W. M., Yan, M. and Zhao, J. 2022. Experimental study on additive manufactured 304L stainless steel tubular sections: Material properties and cross-sectional behaviour. *Engineering Structures*, 273, 115093.
- Foster, L., Peketi, P., Allen, T., Senior, T., Duncan, O. and Alderson, A. 2018. Application of auxetic foam in sports helmets. *Applied Sciences*, 8(3), 354.
- Frenzel, T., Kadic, M. and Wegener, M. 2017. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist. *Science*, 358(6366), 1072-1074.
- Fung, Y. C. 1965. Foundations of solid mechanics. Prentice-Hall, 525, New Jersey.
- Gao, Q., Ge, C., Zhuang, W., Wang, L. and Ma, Z. 2019. Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading. *Materials and Design*, 161, 22-34.
- Giakoumelis, G. and Lam, D. 2004. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(7), 1049-1068.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., Schajer, G. S. and Robertson, C. I. 1982. The mechanics of two-dimensional cellular materials. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782), 25-42.
- Glazzard, M. and Breedon, P. 2014. Weft-knitted auxetic textile design. *Physica Status Solidi (b)*, 251(2), 267-272.
- Gomes, R. A., de Oliveira, L. A., Francisco, M. B. and Gomes, G. F. 2023. Tubular auxetic structures: a review. *Thin-Walled Structures*, 188, 110850.
- Grima, J. N. and Evans, K. E. 2000. Auxetic behaviour from rotating squares. *Journal of Materials Science Letters*, 19, 1563-1565.
- Grima, J. N., Gatt, R., Alderson, A. and Evans, K. E. 2005. On the auxetic properties of 'rotating rectangles' with different connectivity. *Journal of the Physical Society of Japan*, 74(10), 2866-2867.

- Grima, J. N., Gatt, R. and Farrugia, P. S. 2008. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. *Physica Status Solidi (b)*, 245(3), 511-520.
- Grima, J. N., Mizzi, L., Azzopardi, K. M. and Gatt, R. 2016. Auxetic perforated mechanical metamaterials with randomly oriented cuts. *Advanced materials*, 28(2), 385-389.
- Guo, Y., Zhang, J., Chen, L., Du, B., Liu, H., Chen, L., Li, W. and Liu, Y. 2020. Deformation behaviours and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load. *Aerospace Science and Technology*, 98, 105662.
- Günaydın, K., Eren, Z., Kazancı, Z., Scarpa, F., Grande, A. M. and Türkmen, H. S. 2019. In-plane compression behaviour of anti-tetrachiral and re-entrant lattices. *Smart Materials and Structures*, 28(11), 115028.
- Han, D., Zhang, Y., Zhang, X. Y., Xie, Y. M. and Ren, X. 2023. Lightweight auxetic tubular metamaterials: design and mechanical characteristics. *Composite Structures*, 311, 116849.
- Han, L. H., Yao, G. H. and Tao, Z. 2007. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*, 45(1), 24-36.
- Horváth, A., Kollár, D. and Kövesdi, B. 2022. Behaviour of CFST stub columns subjected to Pure compression. *International Journal of Steel Structures*, 22(4), 1175-1188.
- Hu, H. T., Huang, C. S. and Chen, Z. L. 2005. Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(12), 1692-1712.
- Hu, H. T., Huang, C. S., Wu, M. H. and Wu, Y. M. 2003. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. *Journal of Structural Engineering*, 129(10), 1322-1329.
- Huang, C. S., Yeh, Y. K., Liu, G. Y., Hu, H. T., Tsai, K. C., Weng, Y. T., Wang, S. H. and Wu, M. H. 2002. Axial load behaviour of stiffened concrete-filled steel columns. *Journal of structural engineering*, 128(9), 1222-1230.
- Huo, R. Y., Han, D., Zhang, Y., Jiang, W., Peng, X. W., Shi, G. C. J., Chu, M. H., Zhang, X. Y., Xie, Y. M. and Ren, X. 2023. Mechanical properties of auxetic circular and square tubes filled with aluminum foam. *Engineering Structures*, 281, 115732.
- Huo, S., Gao, Z. and Ruan, D. 2022. Crashworthiness of a hybrid tube with an auxetic layer. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106755.
- Jiang, J. F. and Wu, Y. F. 2012. Identification of material parameters for Drucker–Prager plasticity model for FRP confined circular concrete columns. *International Journal of Solids and Structures*, 49(3-4), 445-456.
- Jiang, L. and Hu, H. 2017a. Low-velocity impact response of multilayer orthogonal structural composite with auxetic effect. *Composite Structures*, 169, 62-68.

- Jiang, L. and Hu, H. 2017b. Finite element modeling of multilayer orthogonal auxetic composites under low-velocity impact. *Materials*, 10(8), 908.
- Jiang, Y. and Li, Y. 2018. Novel 3D-printed hybrid auxetic mechanical metamaterial with chirality-induced sequential cell opening mechanisms. *Advanced Engineering Materials*, 20(2), 1700744.
- Johnson, G. R. 1983. A Constitutive Model and Data for Metals Subject to Large Strains, High Strain Rate and High Temperatures. 7th International Symposium on Ballistics, 19-21 April, The Hague, Netherlands.
- Joseph, A., Mahesh, V. and Harursampath, D. 2021. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. *Advances in Manufacturing*, 9(3), 342-368.
- Kedziora, S. and Anwaar, M. O. 2019. Concrete-filled steel tubular (CFTS) columns subjected to eccentric compressive load. *AIP Conference Proceedings*, 2060-1.
- Kelkar, P. U., Kim, H. S., Cho, K. H., Kwak, J. Y., Kang, C. Y. and Song, H. C. 2020. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: a review. *Sensors*, 20(11), 3132.
- Kelvin, W. T. B. 1894. *The molecular tactics of a crystal*. Clarendon Press, 58, London.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H. 1969. Behavior of concrete under biaxial stresses, *ACI Materials Journal*, 66(8), 656–666.
- Lakes, R. 1987. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235(4792), 1038-1040.
- Li, X., Wu, F., Hu, H., Zhong, S. and Liu, Y. 2002. Large acoustic band gaps created by rotating square rods in two-dimensional periodic composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(1), L15.
- Linforth, S., Ngo, T., Tran, P., Ruan, D. and Odish, R. 2021. Investigation of the auxetic oval structure for energy absorption through quasi-static and dynamic experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 147, 103741.
- Lira, C., Scarpa, F. and Rajasekaran, R. 2011. A gradient cellular core for aeroengine fan blades based on auxetic configurations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(9), 907-917.
- Logakannan, K. P., Rengaswamy, J., Kumar, S., Ramachandran, V. and Ruan, D. 2022. Mechanical response of a novel hybrid tube composed of an auxetic outer layer. *Thin-Walled Structures*, 171, 108649.
- LS-DYNA keyword user's manual ver. 971'. Livermore Software Technology Corporation, 2016, Livermore, CA, USA.
- Luo, C., Ren, X., Han, D., Zhang, X. G., Zhong, R., Zhang, X. Y. and Xie, Y. M. 2022. A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: design and compressive characteristic study. *Engineering Structures*, 268, 114759.

- Mander, J. B., Priestley, M. J. and Park, R. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- Masters, I. G. and Evans, K. E. 1996. Models for the elastic deformation of honeycombs. *Composite Structures*, 35(4), 403-422.
- McCaw, J. C. and Cuan-Urquizo, E. 2018. Curved-layered additive manufacturing of non-planar, parametric lattice structures. *Materials and Design*, 160, 949-963.
- Meena, K. and Singamneni, S. 2019. A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials and Design*, 173, 107779.
- Miller, W., Hook, P. B., Smith, C. W., Wang, X. and Evans, K. E. 2009. The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite. *Composites Science and Technology*, 69(5), 651-655.
- Mir, M., Ali, M. N., Sami, J. and Ansari, U. 2014. Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Mizzi, L., Attard, D., Gatt, R., Pozniak, A. A., Wojciechowski, K. W. and Grima, J. N. 2015. Influence of translational disorder on the mechanical properties of hexachiral honeycomb systems. *Composites Part B: Engineering*, 80, 84-91.
- Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Ahmad, Z. and Alias, A. 2016. Influence of auxetic foam in quasi-static axial crushing. *International Journal of Materials Research*, 107(10), 916-924.
- Mohsenizadeh, S., Alipour, R., Rad, M. S., Nejad, A. F. and Ahmad, Z. 2015. Crashworthiness assessment of auxetic foam-filled tube under quasi-static axial loading. *Materials and Design*, 88, 258-268.
- Nedoushan, R. J., An, Y., Yu, W. R. and Abghary, M. J. 2021. Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness. *Composite Structures*, 277, 114605.
- Nedoushan, R. J. and Yu, W. R. 2020. A new auxetic structure with enhanced stiffness via stiffened elliptical perforations. *Functional Composites and Structures*, 2(4), 045006.
- Nia, A. A. and Hamedani, J. H. 2010. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thin walled tubes with various section geometries. *Thin-Walled Structures*, 48(12), 946-954.
- Orhan, S. N. and Erden, Ş. 2022a. Design and finite element analysis of a novel auxetic structure. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 8(4), 159-165.
- Orhan, S. N. and Erden, Ş. 2022b. Numerical investigation of the mechanical properties of 2D and 3D auxetic structures. *Smart Materials and Structures*, 31(6), 065011.
- Palanivelu, S., Van Paepegem, W., Degrieck, J., Van Ackeren, J., Kakogiannis, D., Van Hemelrijck, D., Wastiels, J. and Vantomme, J. 2010. Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes. *Polymer Testing*, 29(2), 224-234.

- Poirier, J. P. 2000. Introduction to the Physics of the Earth's Interior. Cambridge University Press, 309, United Kingdom.
- Prall, D. and Lakes, R. S. 1997. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(3), 305-314.
- Prawoto, Y. 2012. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 58, 140-153.
- Pruksawan, S., Chee, H. L., Wang, Z., Luo, P., Chong, Y. T., Thitsartarn, W. and Wang, F. 2022. Toughened hydrogels for 3D printing of soft auxetic structures. *Chemistry–An Asian Journal*, 17(19), e202200677.
- Rad, M. S., Hatami, H., Ahmad, Z. and Yasuri, A. K. 2019. Analytical solution and finite element approach to the dense re-entrant unit cells of auxetic structures. *Acta Mechanica*, 230, 2171-2185.
- Ren, X., Shen, J., Ghaedizadeh, A., Tian, H. and Xie, Y. M. 2016. A simple auxetic tubular structure with tuneable mechanical properties. *Smart Materials and Structures*, 25(6), 065012.
- Ren, X., Zhang, Y., Han, C. Z., Han, D., Zhang, X. Y., Zhang, X. G. and Xie, Y. M. 2022. Mechanical properties of foam-filled auxetic circular tubes: experimental and numerical study. *Thin-Walled Structures*, 170, 108584.
- Ruan, H., Ning, J., Wang, X. and Li, D. 2021. Novel tubular structures with negative Poisson's ratio and high stiffness. *Physica Status Solidi (b)*, 258(4), 2000503.
- Saxena, K. K., Das, R. and Calius, E. P. 2016. Three decades of auxetics research—materials with negative Poisson's ratio: a review. *Advanced Engineering Materials*, 18(11), 1847-1870.
- Scarpa, F. and Tomlin, P. J. 2000. On the transverse shear modulus of negative Poisson's ratio honeycomb structures. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 23(8), 717-720.
- Scarpa, F., Bullough, W. A. and Lumley, P. 2004. Trends in acoustic properties of iron particle seeded auxetic polyurethane foam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(2), 241-244.
- Scintilla, L. D., Palumbo, G., Sorgente, D. and Tricarico, L. 2013. Fiber laser cutting of Ti6Al4V sheets for subsequent welding operations: Effect of cutting parameters on butt joints mechanical properties and strain behaviour. *Materials and Design*, 47, 300-308.
- Simpson, J. and Kazancı, Z. 2020. Crushing investigation of crash boxes filled with honeycomb and re-entrant (auxetic) lattices. *Thin-Walled Structures*, 150, 106676.

- Spadoni, A. and Ruzzene, M. 2012. Elasto-static micropolar behaviour of a chiral auxetic lattice. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 60(1), 156-171.
- Sunil, S. and Kapoor, R. 2020. Effect of strain rate on the formation of strain-induced martensite in AISI 304L stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51, 5667-5676.
- Tasdemirci, A., Akbulut, E. F., Guzel, E., Tuzgel, F., Yucesoy, A., Sahin, S. and Guden, M. 2018. Crushing behaviour and energy absorption performance of a bio-inspired metallic structure: Experimental and numerical study. *Thin-Walled Structures*, 131, 547-555.
- Tuzgel, F., Akbulut, E. F., Guzel, E., Yucesoy, A., Sahin, S., Tasdemirci, A. and Guden, M. 2022. Testing and modeling blast loading of a sandwich structure cored with a bio-inspired (balanus) core. *Thin-Walled Structures*, 175, 109185.
- Veronda, D. R. and Westmann, R. A. 1970. Mechanical characterization of skin—finite deformations. *Journal of Biomechanics*, 3(1), 111-124.
- Wang, H., Xiao, S. and Wang, J. 2021. Disordered auxetic metamaterials architected by random peanut-shaped perturbations. *Materials and Design*, 212, 110291.
- Wang, H., Zhang, Y., Lin, W. and Qin, Q. H. 2020. A novel two-dimensional mechanical metamaterial with negative Poisson's ratio. *Computational Materials Science*, 171, 109232.
- Wang, J., Zhang, Y., He, N. and Wang, C. H. 2018. Crashworthiness behaviour of Koch fractal structures. *Materials and Design*, 144, 229-244.
- Wang, Q., Yang, Z., Lu, Z. and Li, X. 2020. Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression. *Materials and Design*, 186, 108226.
- Wang, Y., Zhao, W., Zhou, G. and Wang, C. 2018. Analysis and parametric optimization of a novel sandwich panel with double-V auxetic structure core under air blast loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 142, 245-254.
- Wang, Z. P., Poh, L. H., Dirrenberger, J., Zhu, Y. and Forest, S. 2017. Isogeometric shape optimization of smoothed petal auxetic structures via computational periodic homogenization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 323, 250-271.
- Wang, Z. and Hu, H. 2014. Auxetic materials and their potential applications in textiles. *Textile Research Journal*, 84(15), 1600-1611.
- Wang, Z., Luan, C., Liao, G., Liu, J., Yao, X. and Fu, J. 2020. Progress in auxetic mechanical metamaterials: structures, characteristics, manufacturing methods, and applications. *Advanced Engineering Materials*, 22(10), 2000312.
- Williams, J. L. and Lewis, J. L. 1982. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis. *Journal of Biomechanical Engineering*, 104(1), 50-56.

- Wongchai, B. 2021. Auxetic two-dimension material with modified peanut pattern. *Geomate Journal*, 20(79), 34-41.
- Wu, W., Song, X., Liang, J., Xia, R., Qian, G. and Fang, D. 2018. Mechanical properties of anti-tetrachiral auxetic stents. *Composite Structures*, 185, 381-392.
- Xiao, D., Dong, Z., Li, Y., Wu, W. and Fang, D. 2019. Compression behaviour of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: Experiment and finite element analysis. *Materials Science and Engineering: A*, 758, 163-171.
- Xu, F., Sun, G., Li, G. and Li, Q. 2014. Experimental study on crashworthiness of tailor-welded blank (TWB) thin-walled high-strength steel (HSS) tubular structures. *Thin-Walled Structures*, 74, 12-27.
- Xu, T., Xiang, T., Zhao, R. and Zhan, Y. 2010. Nonlinear finite element analysis of circular concrete-filled steel tube structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 35(3), 315.
- Xue, Y., Mu, J., Huang, Y., Zhou, L. and Shi, Z. 2021. Compressive mechanical properties of ex-situ auxetic composite-filled tubes. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1644-1654.
- Yang, S., Qi, C., Wang, D., Gao, R., Hu, H. and Shu, J. 2013. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 589216.
- Yao, Y., Wang, L., Li, J., Tian, S., Zhang, M. and Fan, Y. 2020. A novel auxetic structure based bone screw design: Tensile mechanical characterization and pullout fixation strength evaluation. *Materials and design*, 188, 108424.
- Yin, H., Wen, G., Hou, S. and Chen, K. 2011. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes. *Materials and Design*, 32(8-9), 4449-4460.
- Yu, Q., Tao, Z. and Wu, Y. X. 2008. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 46(4), 362-370.
- Zhang, C., Xiao, S. H., Qin, Q. H. and Wang, H. 2021. Tunable compressive properties of a novel auxetic tubular material with low stress level. *Thin-Walled Structures*, 164, 107882.
- Zhang, Y., Sun, L., Ren, X., Zhang, X. Y., Tao, Z. and Xie, Y. M. 2022. Design and analysis of an auxetic metamaterial with tuneable stiffness. *Composite Structures*, 281, 114997.
- Zhang, Y., Wei, Y., Bai, J. and Zhang, Y. 2019. Stress-strain model of an FRP-confined concrete filled steel tube under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 142, 149-159.
- Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson, J. A., Kucheyev, S. O., Fang, N. X. and

- Spadaccini, C. M. 2014. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials. *Science*, 344(6190), 1373-1377.
- Zhong, R., Ren, X., Zhang, X. Y., Luo, C., Zhang, Y. and Xie, Y. M. 2022. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures. *Construction and Building Materials*, 322, 126453.
- Zhou, H., Jia, K., Wang, X., Xiong, M. X. and Wang, Y. 2020. Experimental and numerical investigation of low velocity impact response of foam concrete filled auxetic honeycombs. *Thin-Walled Structures*, 154, 106898.
- Zhu, Y., Wang, J., Cai, X., Xu, Z. and Wen, Y. 2023. Cyclic behaviour of ellipse and peanut-shaped perforated buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 291, 116432.
- Zied, K., Osman, M. and Elmahdy, T. 2015. Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores. *Physica Status Solidi (b)*, 252(12), 2685-2692.

YAYINLAR

- Solak, K. and Orhan, S. N. 2022. Performance evaluation of peanut-shaped tubular auxetics with enhanced stiffness: a finite element study. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 31(1), 015006.
- Orhan, S. N. and Solak, K. 2022. 2D Finite element simulation of elliptic hole auxetics, *International Congress on Innovation Technologies & Engineering*, 2-4 September, Book of Abstracts, İzmir.
- Orhan, S. N. and Solak, K. 2022. A numerical study on the mechanical properties of peanut-shape auxetic tubular structures, *International Technology Sciences and Design Symposium*, 2-5 June, Book of Abstracts, Giresun.
- Solak, K. and Orhan, S. N. 2023. A review of auxetic materials: properties, classifications, manufacturing and applications, In: *International Studies in Engineering*. Özalp, C., & Bardak, S. (eds), Serüven Publishing, 123-146, Ankara.
- Solak, K. and Orhan, S. N. 2023. Axial compression behaviour of concrete-filled auxetic tubular short columns. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 14(1), 1-9.