



**BETON DOLGULU ÖKSETİK KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN NÜMERİK OLARAK
BELİRLENMESİ**

Oğuzhan UĞURLU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN**

2023

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BETON DOLGULU ÖKSETİK KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN NÜMERİK OLARAK BELİRLENMESİ**

Oğuzhan UĞURLU

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.

18 / 07 / 2023

Oğuzhan UĞURLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETON DOLGULU ÖKSETİK KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN NÜMERİK OLARAK BELİRLENMESİ

Oğuzhan UĞURLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

Bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, rölatif yoğunluğu sabit tutulan altısı öksetik (re-entrant, arrowhead, yeni arrowhead, lozenge grid, formed from square grid ve star honeycomb) üçü geleneksel (honeycomb, isogrid ve rectangle grid) kafes yapı betonla doldurularak dokuz adet kompozit yapı elde edilmiştir. Bu kompozit yapıların basınç altındaki davranışı sayısal modeller oluşturularak incelenmiştir. Bu sayısal analizlerde kompozitlerde kullanılan kafes yapıların Poisson oranlarının ve direngenliklerinin kompozit yapıların davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. En yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olan yapının beton dolgulu rectangle grid olduğu saptanmıştır. İkinci bölümde ise en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olan beton dolgulu birer öksetik ve geleneksel kafes yapı seçilmiştir. Öksetik kafes için re-entrant, geleneksel kafes için rectangle grid yapısı kullanılmıştır. Bu kompozit yapıların içerisinde bulunan kafeslerin birim hücre kalınlıkları ve boyutları üzerine bir parametrik çalışma yapılmış ve yapıların dayanım ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Bu iki kompozitte kullanılan kafeslerin birim hücre kalınlıkları arttıkça, beton dolgulu re-entrant kafesin beton dolgulu rectangle grid kafese göre çok daha yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesi sergilediği görülmüştür. Bu iki kompozitte kullanılan kafeslerin birim hücre boyutu arttığında ise her iki kompozit yapının dayanımlarının düştüğü belirlenmiştir. Yapılan tüm çalışmalar değerlendirildiğinde, beton dolgulu uygun birim hücre kalınlığına ve boyutuna sahip re-entrant kafes yapının, beton dolgulu rectangle grid kafes yapısından daha iyi mekanik davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

2023, 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Öksetik, Negatif Poisson Oranı, Beton, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Enerji Yutma Kapasitesi

ABSTRACT

MS. Thesis

NUMERICAL DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE-FILLED AUXETIC COMPOSITES

Oğuzhan UĞURLU

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Süleyman Nazif ORHAN

This study consists of two parts. In the first part, nine composite structures were obtained by filling concrete into six auxetic (re-entrant, arrowhead, new arrowhead, lozenge grid, formed from square grid and star honeycomb) and three conventional (honeycomb, isogrid and rectangle grid) lattice structures with constant relative density. The behavior of these composite structures under compression was investigated by creating numerical models. Numerical analysis were conducted to examine the effects of the Poisson's ratios and stiffnesses of the lattice structures used in the composites on the behavior of the composite structures. It was determined that the structure with the highest strength and energy absorption capacity was the concrete-filled rectangle grid. In the second part, the models with the highest strength and energy absorption capacity are selected as one each for concrete filled auxetic and conventional lattice structures. Re-entrant is considered for the auxetic lattice, while the rectangular grid structure is used for the conventional lattice. A parametric study was performed on the unit cell thicknesses and sizes of the lattices in these composite structures and their strength and energy absorption capacities were compared. It was observed that as the unit cell thickness of the lattices used in these two composites increased, the concrete-filled re-entrant lattice exhibited much higher strength and energy absorption capacity than the concrete-filled rectangle grid lattice. As the unit cell size of the lattices used in these two composites increased, it was revealed that the strengths of both composite structures decreased. When all the studies are evaluated, it is determined that concrete-filled re-entrant structure showed better mechanical behavior than concrete-filled rectangle grid structure at an appropriate lattice unit cell thickness and size.

2023, 95 page

Keywords: Auxetics, Negative Poisson's Ratio, Concrete, Finite Element Method, Energy Absorption Capacity

TEŞEKKÜR

Bu alıŐma boyunca değerli vaktini, bilgisi ve desteklerini esirgemeyerek benimle paylaŐan tez danıŐmanım Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN hocama teŐekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde bana destek olan aileme ve arkadaşlarıma teŐekkürlerimi sunarım.

Tez yazım sürecinde her türlü desteği ve motivasyonu sağlayan çalışma arkadaşlarıma ve hocalarıma teŐekkürü bir borç bilirim.

Oğuzhan UĞURLU
Temmuz 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Poisson Oranı.....	1
1.2. Negatif Poisson Oranı (Öksetik Malzeme)	2
1.3. Öksetik Yapıların Avantajları.....	4
1.4. Öksetik Yapıların Yaygın Kullanım Alanları.....	5
1.4.1. Öksetik yapıların biyomedikal alanında kullanımı.....	5
1.4.2. Öksetik yapıların tekstil alanında kullanımı.....	6
1.4.3. Öksetik yapıların hava araçlarında kullanımı.....	6
1.4.4. Öksetik yapıların savunma alanında kullanımı	7
1.5. Kompozit Yapılar ve Avantajları.....	8
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı	10
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	22
3.1. BDÖ Kompozit Yapıların Tasarımları.....	22
3.2. BDG Kompozit Yapıların Tasarımları.....	25
3.3. Sayısal Modeller (Sonlu Elemanlar Analizleri).....	27
3.3.1. Sayısal modellerin doğrulama çalışması.....	27
3.3.2. Sayısal modellerde kullanılan parametreler	31
3.3.3. Kafes yapıların poisson oranları ve direngenlikleri.....	32
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	33
4.1. Sayısal Modellerin Doğrulama Çalışması Sonuçları	33
4.2. Dolgulu Kafes Yapıların Analizlerinin İncelenmesi.....	35
4.3. BDÖ ve BDG Kompozit Yapıları Üzerinde Parametrik Çalışma	49
4.3.1. Birim hücre kalınlıkları.....	50

4.3.2. Birim hücre boyutları.....	54
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	72
EK-1	72
EK-2	76
EK-3	84



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
D_1	Plastik Hacim Gerinim Parametresi
D_2	Plastik Hacim Gerinim Parametresi
E	Elastisite Modülü
G	Kayma Modülü
GPa	Gigapascal
kg	Kilogram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
RDAM0	Sünek Hasar Mekaniği Parametresi
W	Plastik Hacim Gerinim Parametresi
X_0	Plastik Hacim Gerinim Parametresi
α	Kesme Göçmesi Parametresi
α_1	Burulma Parametresi
α_2	Üç Eksenli Basınç Parametresi
β	Kesme Göçmesi Parametresi
β_1	Burulma Parametresi
β_2	Üç Eksenli Basınç Parametresi
γ	Kesme Göçmesi Parametresi
γ_1	Burulma Parametresi
γ_2	Üç Eksenli Basınç Parametresi
ε_b	Boyuna birim şekil değiştirme
ε_e	Enine birim şekil değiştirme
θ	Kesme Göçmesi Parametresi
θ_1	Burulma Parametresi
θ_2	Üç Eksenli Basınç Parametresi
ν	Poisson Oranı

Kısaltmalar

2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
BDG	Beton Dolgulu Geleneksel
BDG-HC	Beton Dolgulu Geleneksel Honeycomb
BDG-IG	Beton Dolgulu Geleneksel Isogrid
BDÖ	Beton Dolgulu Öksetik
BDÖ-AH	Beton Dolgulu Öksetik Arrowhead
BDÖ-FFSG	Beton Dolgulu Öksetik Formed From Square Grid
BDÖ-LG	Beton Dolgulu Öksetik Lozenge Grid
BDÖ-RE	Beton Dolgulu Öksetik Re-Entrant
BDÖ-RG	Beton Dolgulu Geleneksel Rectangle Grid
BDÖ-SH	Beton Dolgulu Öksetik Star Honeycomb
BDÖ-YAH	Beton Dolgulu Öksetik Yeni Arrowhead
y.y.	Yüzyıl

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Eksenel çekme etkisi altında geleneksel malzemenin şekil değiştirmesi.....	1
Şekil 1.2. a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme davranışı, b) Negatif Poisson oranına sahip malzeme davranışı (Yan et al. 2021).....	3
Şekil 1.3. Öksetik davranışa sahip bir stent (Park 2017).....	5
Şekil 1.4. Öksetik davranışa sahip bir örgü (Grimmelsmann et al. 2016).....	6
Şekil 1.5. Öksetik kafes destekli kanat profili (Heo et al. 2013).....	7
Şekil 1.6. Öksetik sandviç paneller üzerinde yapılan patlama testi (Kalubadanage et al. 2021).	8
Şekil 1.7. Bir kompozit yapıda matris ve takviye bileşenleri (Hassani et al. 2021).....	8
Şekil 1.8. Katmanlarına ayrılmış bir sandviç kompozit yapı modeli (Bitzer 1997).....	9
Şekil 3.1. BDÖ kompozitlerin ve öksetik birim hücrelerin boyutları: (a) BDÖ-RE; (b) BDÖ-AH; (c) BDÖ-YAH; (d) BDÖ-LG; (e) BDÖ-FFSG; (f) BDÖ-SH (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).	23
Şekil 3.2. BDG kompozitlerin ve geleneksel birim hücrelerin boyutları: (a) BDG-HC; (b) BDG-RG; (c) BDG-IG (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).	26
Şekil 3.3. Sayısal modelin doğrulamasında kullanılan ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada incelenen re-entrant kompozit yapı.	31
Şekil 3.4. Kafes yapılara uygulanan sınır şartlarının rectangle grid kafes yapı üzerinde gösterimi.	32
Şekil 4.1. Beton dolgulu yatay elemanları çift kat olan re-entrant yapının kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.	34
Şekil 4.2. Beton dolgulu yatay elemanları çift kat olan re-entrant yapının enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.	34
Şekil 4.3. Kafes yapıların Poisson oranlarının hesaplanmasında kullanılan doğru parçalarının re-entrant kafes yapı üzerinde gösterimi.	35
Şekil 4.4. Kompozit yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.	37
Şekil 4.5. Kompozit yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri.	37
Şekil 4.6. BDÖ-RE kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	39
Şekil 4.7. a) BDÖ-YAH ve b) BDÖ-AH kompozit yapıların kesitlerinin en kısa ölçüleri	40

Şekil 4.8. (a) BDÖ-YAH ve (b) BDÖ-AH yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	41
Şekil 4.9. Lozenge grid kafes yapısının basınç altında, x yönündeki yer değiştirme değerleri.....	41
Şekil 4.10. BDÖ-LG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	42
Şekil 4.11. BDÖ-FFSG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kesmeye bağlı oluşan “X” şeklindeki göçmenin görüntüsü.....	43
Şekil 4.12. BDÖ-SH kompozitinin ana yük taşıma yönlerinin gösterimi	44
Şekil 4.13. BDÖ-SH kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	45
Şekil 4.14. BDG-HC kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	46
Şekil 4.15. BDG-IG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	47
Şekil 4.16. Rectangle grid kafesin gösterimi	48
Şekil 4.17. BDG-RG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.	49
Şekil 4.18. Beton dolgulu, farklı birim hücre kalınlığına sahip kafes yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	51
Şekil 4.19. Beton dolgulu, farklı birim hücre kalınlığına sahip kafes yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri.....	52
Şekil 4.20. Re-entrant kafes yapısının basınç altında daralma yönünün gösterimi.....	53
Şekil 4.21. BDÖ-RE kompozitlerin ve birim hücrelerin boyutları: (a) BDÖ-RE-12/15; (b) BDÖ-RE-18/20; (c) BDÖ-RE-24/25 (d) BDÖ-RE-30/30 (e) BDÖ-RE-38/35 (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).	54
Şekil 4.22. BDG-RG kompozitlerin ve birim hücrelerinin boyutları: (a) BDG-RG-7,5/10; (b) BDG-RG-13/15; (c) BDG-RG-18,5/20 (d) BDG-RG-23/25 (e) BDG-RG-31/35 (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).	56
Şekil 4.24. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	59
Şekil 4.25. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri.....	59

- Şekil 4.26.** Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kesmeye bağlı oluşan “X” şeklindeki göçmenin görüntüsü: (a) BDÖ-RE-12/15; (b) BDÖ-RE-18/20; (c) BDÖ-RE-24/25. 61
- Şekil 4.27.** Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve eksenel basınca bağlı göçmenin olduğu beton elemanlarının görüntüsü: (a) BDÖ-RE-30/30; (b) BDÖ-RE-38/35. 61
- Şekil 4.28.** Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RG kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kompozit yapıların kafeslerindeki burkulan parçaların görüntüsü (a) BDÖ-RG-23/25; (b) BDÖ-RG-31/35. 62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Sıklıkla kullanılan malzemelerin Poisson oranları (Köster and Franz 1961; Ohsaki and Iwasaki 1973; Greaves et al. 2011).....	2
Çizelge 3.1. BDÖ kompozitlerin geometrik özellikleri.....	23
Çizelge 3.2. BDG kompozitlerin geometrik özellikleri.....	26
Çizelge 3.3. Skewness değerine göre eleman kalitesi (Anonymous 2022a).....	28
Çizelge 3.4. Alüminyumun mekanik özellikleri	29
Çizelge 3.5. Betonun mekanik özellikleri.....	30
Çizelge 4.1. Sayısal modellerin doğrulama çalışmasının ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmanın karşılaştırılması.....	33
Çizelge 4.2. Kafes yapıların birim hücre kalınlıkları, Poisson oranları ve direngenlikleri	36
Çizelge 4.3. Kompozit yapıların, kafeslerinin birim hücre kalınlıkları, dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.....	38
Çizelge 4.4. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip beton dolgulu kafes yapıların geometrik özellikleri.....	50
Çizelge 4.5. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip kafes yapıların Poisson oranları ve direngenlikleri	51
Çizelge 4.6. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip beton dolgulu kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.....	52
Çizelge 4.7. Farklı boyuttaki birim hücreye sahip beton dolgulu kafes yapıların geometrik özellikleri.....	54
Çizelge 4.8. Farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların geometrik özellikleri ..	57
Çizelge 4.9. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.....	58

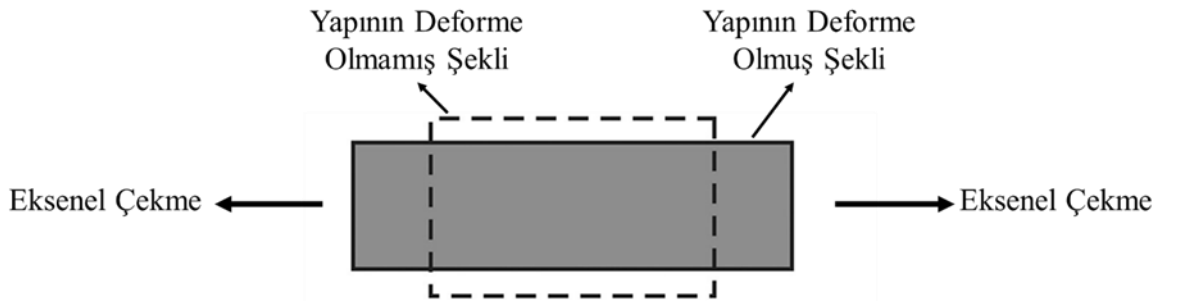
1. GİRİŞ

1.1. Poisson Oranı

Mühendislik alanında kullanılan birçok malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden biri olan Poisson oranı, Fransız fizikçi ve matematikçi Simeon Denis Poisson tarafından bulunmuştur. Poisson oranı “ ν ” sembolü ile gösterilmektedir ve birimsiz bir büyüklüktür (Greaves et al. 2011). Poisson oranı çok farklı şekillerde tanımlanmakla birlikte, bu oranın en yaygın tanımı aksel çekme kuvveti uygulandığında, kuvvete dik doğrultudaki kısalmanın, kuvvetin uygulandığı eksendeki uzamaya oranı şeklinde ifade edilebilir. Poisson oranının matematiksel ifadesi; Eşitlik 1.1’de gösterilmiştir. Burada “ ϵ_e ”, enine birim şekil değiştirmeyi, “ ϵ_b ” boyuna birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

$$\nu = \frac{-\epsilon_e}{\epsilon_b} \quad (1.1)$$

Malzemenin kararlı ve izotropik olması ile birlikte lineer elastik davranış göstermesi durumunda Poisson oranının teorik olarak alt sınırı -1 üst sınırı ise 0,5 olarak hesaplanmaktadır. Bu alt ve üst sınırlar, bir malzemenin elastisite modülünün, kayma modülünün ve hacim modülünün termodinamik sınır koşulları altında pozitif olması zorunluluğundan gelmektedir (Gerçek 2007). Bununla birlikte deneysel çalışmalarda bu alt ve üst sınırın üzerinde veya altında değerlere de rastlanılmaktadır. Şekil 1.1’de geleneksel davranışa sahip bir malzemenin şekil değiştirmesi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Aksel çekme etkisi altında geleneksel malzemenin şekil değiştirmesi

1. GİRİŞ

Her malzeme kendine özgü bir Poisson oranına sahiptir ve mühendislik alanında kullanılan malzemelerin hemen hemen tamamının Poisson oranı literatürde bulunmaktadır. Çizelge 1.1’de günlük hayatta karşılaşılan bazı malzemelerin Poisson oranları verilmiştir.

Çizelge 1.1. Sıklıkla kullanılan malzemelerin Poisson oranları (Köster and Franz 1961; Ohsaki and Iwasaki 1973; Greaves et al. 2011).

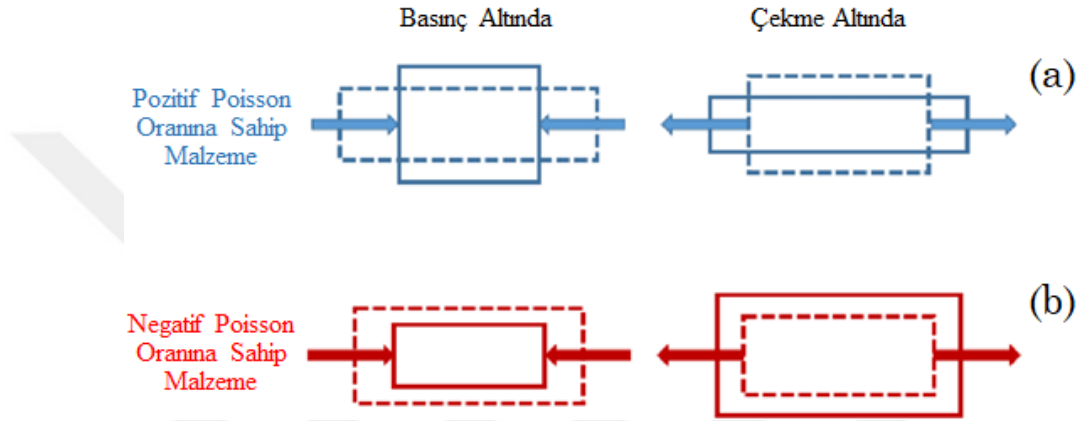
Malzeme	Poisson Oranı
Altın	0,42-0,44
Alüminyum	0,32
Bakır	0,33
Beton	0,16-0,2
Çelik	0,27-0,30
Dökme Demir	0,21-0,26
Doymuş Kil	0,40-0,49
Kauçuk	0,5
Kil	0,30-0,45
Köpük	0,10-0,50
Kum	0,20-0,45
Lastik	0,49
Magnezyum	0,25-0,28
Mantar	0
Paslanmaz Çelik	0,30-0,31
Titanyum	0,26-0,34

1.2. Negatif Poisson Oranı (Öksetik Malzeme)

Doğada bulunan çoğu malzeme pozitif Poisson oranına sahiptir fakat az sayıda negatif Poisson oranına sahip malzeme de bulunmaktadır. Negatif Poisson oranına sahip doğal malzemelere örnek olarak bazı silisyum oksit mineralleri, bazı zeolitler, insan vücudunda bulunan bazı kemiklerin süngerimsi kısımları, inek derisi, tendonlar vb. gösterilebilir (Williams and Lewis 1982; Lees et al. 1991; Keskar et al. 1992; Grima et al 2007; Gatt et al 2015). İlk kez Evans et al. (1991) tarafından, negatif Poisson oranına

1. GİRİŞ

sahip malzeme ifadesinin yerine daha kısa olması için “öksetik (auxetic) malzeme” ifadesi kullanılmıştır. Günümüzde de yaygın olarak kullanılan öksetik terimi, Yunancada “genişleme eğiliminde olan” anlamına gelen “auxetikos” kelimesinden türetilmiştir (Kolken and Zadpoor 2017). Negatif Poisson oranına sahip malzemeler, Şekil 1.2’de gösterildiği üzere pozitif Poisson oranına sahip malzemelerin tersine, basınç etkisi altında kenarlardan daralırken, çekme etkisi altında ise genişleme eğilimi göstermektedirler (Evans et al. 1991).



Şekil 1.2. a) Pozitif Poisson oranına sahip malzeme davranışı, b) Negatif Poisson oranına sahip malzeme davranışı (Yan et al. 2021).

Öksetik yapılar üzerine olan çalışmalar 20. yy.’da başlamıştır ve R. Lakes ve Prof. K. Evans bu alanın öncü isimlerindedir. Yapay öksetik yapıların tasarımları ise 20. yy.’ın sonlarında başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. 21 yy.’da yapılan tasarımlar ve çalışmalar geçen yüzyıla göre önemli ölçüde artmıştır. Bilim insanları yaptıkları her yeni tasarımda, ihtiyaçlar doğrultusunda daha iyi mekanik özelliklere sahip ve/veya daha öksetik bir davranış gösteren yapılar elde etmeye çalışmaktadırlar (Meena and Singamneni 2019).

1.3. Öksetik Yapıların Avantajları

Öksetik yapıların ilk göze çarpan özelliği, bu yapıların geleneksel malzemelerin tam tersi bir deformasyon yeteneğine sahip olmasıdır. Bu temel fark diğer özellikleri de beraberinde getirmektedir. Örneğin, öksetik malzemelerin enerji yutma kapasiteleri geleneksel malzemelerden daha üstündür. Bu durum, öksetik malzemelerin basınç altında topaklanarak uygulanan kuvvete karşı daha fazla mukavemet göstermesinden kaynaklanmaktadır (Brighenti 2014). Statik etkilerin yanı sıra, dinamik yükler altında da yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olan öksetik yapılar, bu özellikleri sayesinde, savunma sanayisinde tercih edilmektedirler (Arifurrahman et al. 2021).

Öksetik yapıların diğer bir özelliği ise bu yapıların yüksek kesme direncine sahip olmasıdır. Öksetik yapıların bu özelliği, Eşitlik 1.2 ile açıklanabilir. Bu eşitlikte Poisson oranı ifadesinin yerine negatif bir değer yazıldığında, bölen kısmının azalmasıyla kayma modülünün artması sağlanmış olunur. Kayma modülünün büyük olması ise kesme direnci yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Alderson and Alderson 2007). Eşitlik 1.2’de “G” kayma modülünü, “E” elastisite modülünü, “v” ise Poisson oranını temsil etmektedir.

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

Negatif Poisson oranına sahip köpük malzemelerde, öksetiklik arttıkça kırılma tokluğunun da arttığı görülmüştür (Choi and Lakes 1996). Yang et al. (2017), kevlar kompozitleri üzerine yaptıkları bir çalışmada, öksetik kevlar kompozitlerin, normal dokuma kevlar kompozitlere kıyasla iki kat daha fazla kırılma tokluğu değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

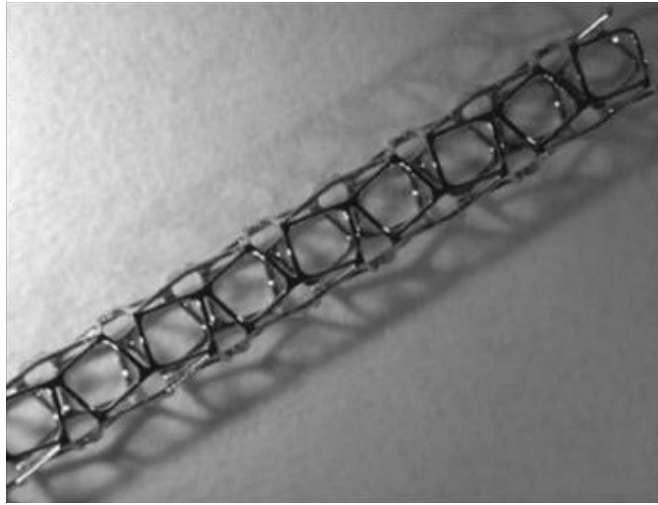
Öksetik malzemeler, yukarıda açıklanan özelliklerin yanı sıra daha iyi sürtünme dayanımı, düşük yoğunluk, plastik hasar direnci, sinklastik eğrilik, ısıl darbe dayanımı ve tutunma dayanımı gibi birçok üstün özelliğe de sahiptirler (Aksu 2016; Erden 2020).

1.4. Öksetik Yapıların Yaygın Kullanım Alanları

Öksetik yapılar, eşsiz özellikleri sayesinde birçok alanda aktif olarak kullanılmakta ve hızlıca diğer alanlara da yayılmaktadırlar. Östetik yapıların kullanım alanları, akıllı filtreler ve sensörler, biyomedikal cihazlar, patlamaya dirençli tekstil ürünleri, koruyucu spor giysileri, ile havacılık ve askeri savunma yapılarından öksetik çivilere kadar uzanmaktadır (Ren et al. 2018; Gao 2021).

1.4.1. Öksetik yapıların biyomedikal alanında kullanımı

Öksetik yapıların biyomedikal alanında kullanımının doku mühendisliğinden, stentler ve sensörler gibi farklı biyomedikal cihazlara kadar uzandığı görülmektedir (Veerabagu et al. 2022). Öksetik stentler üzerine yapılan çalışmalarda (Amin et al. 2015; Bukhari et al. 2017; Xue 2020), bu stentlerin kullanımının klasik stentlere kıyasla daha etkili olduğu belirtilmiştir. Öksetik sensörler üzerinde yapılan çalışmalarda da (Zhang et al. 2017; Mao 2022), bu sensörlerin geleneksel sensörlerden daha verimli olduğu görülmüştür. Doku mühendisliği alanında ise geliştirilen yapay öksetik vasküler greftlerin, geleneksel yapay vasküler greftlere göre dokuya daha iyi yapışma ve uyum sağladığı vurgulanmıştır (Lee et al. 2016). Şekil 1.3.'te öksetik davranışa sahip bir stent görülmektedir.



Şekil 1.3. Öksetik davranışa sahip bir stent (Park 2017)

1.4.2. Öksetik yapıların tekstil alanında kullanımı

Öksetik malzemelerin tekstil alanında kullanımı oldukça yaygındır. Sarmal öksetik iplik kullanılarak üretilen patlamaya dayanıklı perdeler, medikal tekstiller olarak akıllı bandajlar, iyi enerji yutma özellikleri sayesinde koruyucu giysi, ekipmanlar vb. tekstil ürünleri öksetik malzemelerin tekstil alanında kullanımına örnek olarak verilebilir (Stan et al. 2010; Wang and Hu 2014). Bu alandaki en yoğun çalışmalar, öksetik tekstil ürünlerinin yapı taşı olan öksetik iplik ve kumaşların nasıl üretileceği ve mekanik özelliklerinin nasıl geliştirileceği üzerine yapılmaktadır (Ravirala et al. 2006; Sloan et al. 2011; Alderson 2012; Grimmelsmann et al. 2016). Şekil 1.4'te öksetik davranışa sahip örgü detayı verilmiştir.



Şekil 1.4. Öksetik davranışa sahip bir örgü (Grimmelsmann et al. 2016)

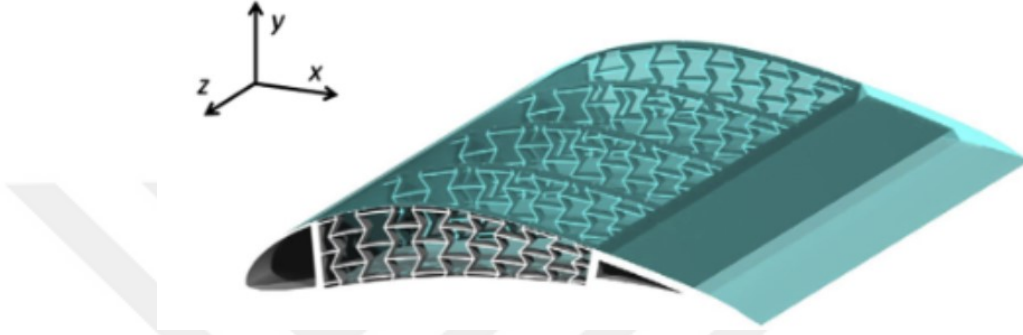
1.4.3. Öksetik yapıların hava araçlarında kullanımı

Öksetik yapılar, sahip oldukları yüksek kesme direnci sayesinde, çok yüksek kesme kuvvetine maruz kalan uçak ve diğer uzay araçlarında kullanılmaktadırlar (Heo et al. 2013). Bununla birlikte uçaklara, kuşlar gibi gökyüzündeki bazı cisimlerin çarpmasıyla kazalar da meydana gelebildiğinden, darbe dayanımı yüksek olan öksetik yapıların kullanılması bu probleme bir çözüm sunmaktadır (Wang et al. 2016).

Heo et al. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, kanat profillerinin içinde destek amacıyla kullanılan öksetik ve geleneksel kafes yapıların, aerostatik yük altında kesme ve eğilme mukavemetleri karşılaştırılmıştır (Şekil 1.5.). Öksetik yapıların hem

1. GİRİŞ

eğilme hem de kesme dirençleri, geleneksel yapılara göre daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca, kanat profil yapısını desteklemek için öksetik re-entrant (Heo et al. 2013; Vigliotti and Pasini 2015), chiral (Airoldi et al. 2015), elliptical ve circular (Budarapu et al. 2016) birim hücreli yapılar, kanat gövdesine yerleştirilerek incelenmiş ve öksetik kafeslerin kullanıldığı kanatlarda, geleneksel davranış sergileyen kafes yapılara göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

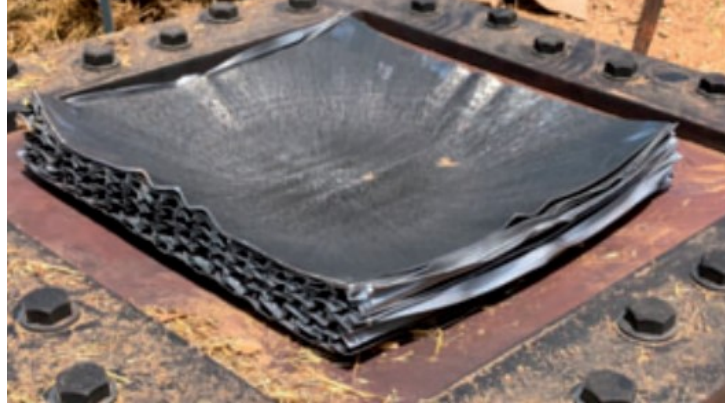


Şekil 1.5. Öksetik kafes destekli kanat profili (Heo et al. 2013)

1.4.4. Öksetik yapıların savunma alanında kullanımı

Savunma alanında, askeri araçlar ve binalar için patlama dayanımı, askeri personeller için ise vücut zırhlarının darbe dayanımı kritik önem taşımaktadır. Öksetik yapılar, yüksek enerji yutma kapasiteleri ve daha iyi darbe sönümlenmeleri sayesinde savunma alanında yaygın bir şekilde tercih edilmektedirler (Chen et al. 2023).

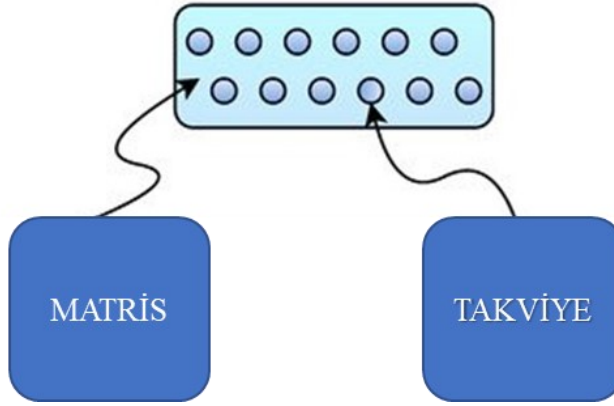
Şekil 1.6'da da gösterildiği gibi, öksetik çekirdekli sandviç panel üzerinde yapılan patlama testlerinde, zırhlı araçların kritik fiziksel altyapısı gibi patlama koruması gerektiren uygulamalar için öksetik yapıların uygun olduğu görülmüştür (Imbalzano et al. 2018; Novak et al. 2019; Kalubadanage et al. 2021). Vücut zırhları üzerine yapılan çalışmalarda, öksetik yapıların yüksek enerji yutma özellikleri sayesinde bu alanda da kullanılabileceği ifade edilmiştir (Shah et al. 2022; Tahir et al. 2022).



Şekil 1.6. Öksetik sandviç paneller üzerinde yapılan patlama testi (Kalubadanage et al. 2021).

1.5. Kompozit Yapılar ve Avantajları

Kompozit yapılar, gözle görülür boyuttaki iki ya da daha fazla bileşene sahip homojen olmayan yapılardır. Kompozit yapılar, genel anlamda takviye ve matris olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır (Şekil 1.7.) (Şahin 2000).



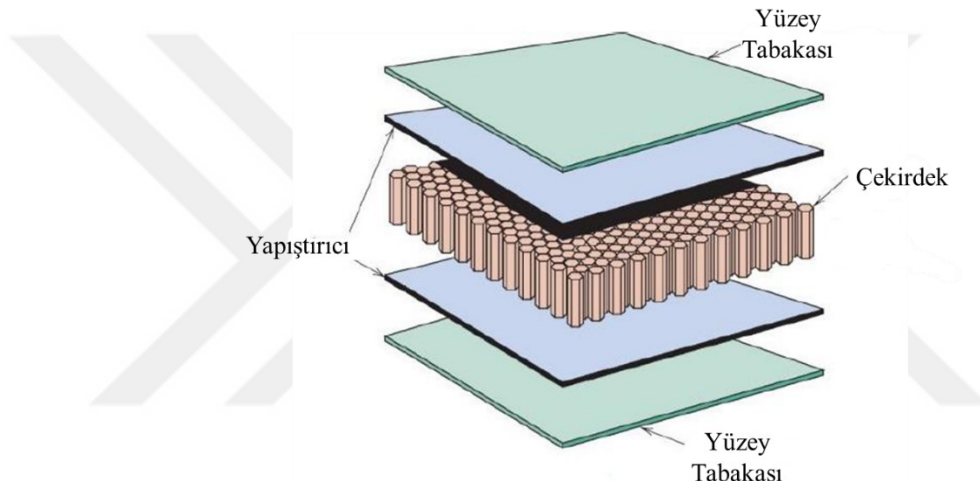
Şekil 1.7. Bir kompozit yapıda matris ve takviye bileşenleri (Hassani et al. 2021)

Kompozit yapılar, matris malzemeye göre kompozitler ve takviye malzemeye göre kompozitler olarak iki alt başlıkta sınıflandırılırlar. Bilinen en yaygın kompozit türleri; seramik matris, organik matris, metal matris, karbon fiber, sandviç ve lamine kompozitlerdir (Vijay et al. 2016). Kompozit yapıların mekanik davranışı, takviye ve matris malzemesinin ara yüzeylerinin birbirine ne kadar iyi yapıştığı ve uyum içinde çalıştığı ile ilgilidir (Kollar et al. 2003). Takviye ve matris malzemeleri kendi öz özellikleri dışında oluşturdukları kompozit malzemeye yüksek mukavemet, yapısal

1. GİRİŞ

stabilite, korozyon direnci, kimyasal direnç, tasarım kolaylığı, rijitlik ve hafiflik gibi yeni özellikler de katabilmektedir (Yastımoğlu ve Özkan 2017).

Kompozit malzeme türlerinden biri olan, Şekil 1.8’de gösterilen sandviç panellerin geometrik yapıları ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurulacak olunursa, sandviç paneller, iki sert yüzey tabaka arasına düşük yoğunluklu bir çekirdek yapı yerleştirilerek üretilirler. Elde edilen bu yapılar; oldukça hafif ve yüksek eğilme rijitliğine sahiptirler (Johnson and Sims 1986).



Şekil 1.8. Katmanlarına ayrılmış bir sandviç kompozit yapı modeli (Bitzer 1997)

İnsanlık tarihi kadar eski olan kompozit malzemenin kullanımı, ilk çağlarda kompozit yaylardan (İkibeş 2022), günümüze otomotivden tekstile, savunma alanından inşaat sektörüne kadar hemen hemen her alanda karşımıza çıkmaktadır (Pastuszak and Muc 2013).

Kompozit yapıların inşaat mühendisliği alanında kullanımları ise lifli betonlardan kompozit duvarlara kadar uzanmaktadır. Bu kompozit yapılardan en bilineni ve birçok yapıda taşıyıcı eleman olarak kullanılanı, betonarme olarak isimlendirilen kompozittir. Betonarme kompozitinde takviye olarak çelik, matris olarak da beton kullanılmaktadır. Betonarmeyi oluşturan malzemelerden beton tek başına kullanıldığında düşük çekme mukavemeti ve gevrek olması nedeniyle oldukça yetersiz kalmaktadır. Çelik ise yüksek mukavemete ve sünekliğe sahiptir fakat ağır ve yüksek

maliyetli bir malzemedir. Çelik ve beton bir arada kullanıldığında ise hem sünek hem de yüksek çekme ve basınç mukavemetine sahip bir kompozit malzeme ortaya çıkmaktadır (Elchalakani et al. 2021; Solak and Orhan 2023).

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Öksetik yapılar ve geleneksel davranışa sahip kafes yapıların karşılaştırılmasıyla ilgili olan çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır ve bu karşılaştırmalarda, öksetik yapıların sahip oldukları bazı avantajları sayesinde geleneksel yapılardan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Güncel çalışmalarda ise dolgulu öksetik kafesler ve geleneksel kafeslerin dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri gibi birçok mukavemet özellikleri karşılaştırılmaktadır (Li et al. 2018). Bu çalışmada ise inşaat sektöründe yüzyıldan uzun bir süredir kullanılan betonarme kompozitinin geleneksel iç tasarımına alternatif olabilecek bir yaklaşımın incelenmesi amaçlanmıştır. Böylece, öksetik ve geleneksel kafes yapılar kullanılarak beton dolgulu tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu beton dolgulu kafeslerin dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri sonlu elemanlar yöntemi analizleri ile sayısal olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Öksetik kafes olarak, literatürde sıklıkla kullanılan öksetik birim hücrelerden re-entrant, arrowhead, yeni arrowhead, lozenge grid, formed from square grid ve star honeycomb yapıları tercih edilmiştir. Geleneksel birim hücreler için ise honeycomb, rectangle grid ve isogrid yapıları seçilmiştir. Seçilen bu birim hücrelerden, SOLIDWORKS 2019 (SolidWorks Corp., MA, USA) ortamında 2B kafes yapılar tasarlanmış ve bu kafesler betonla doldurularak kompozit yapılar modellenmiştir. Kompozitlerin analizleri yapılmadan önce, kafes yapıların Poisson oranları ve dirençlilik değerleri Ansys Workbench 2022.R1 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) yazılımının Static Structural modülünde gerçekleştirilen analizler ile belirlenmiştir.

Tasarlanan kompozitlerin analizlerinin doğrulanması amacıyla öncelikle bir doğrulama çalışması yapılmış ve analizlerdeki eleman tipi ve boyutu ile birlikte sınır şartları belirlenmiştir. Bu doğrulama çalışması için Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmış ve bu çalışmadaki deneysel ve nümerik sonuçlar, gerçekleştirilen analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu doğrulama çalışması

1. GİRİŞ

sonucunda yapıların sonlu eleman ağının tipi ve boyutu, modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, sürtünme katsayıları ve sınır koşullarının doğruluğu ortaya konmuştur.

Yapılan analizlerde, sonlu eleman ağı tipi ve boyutlarının modellere uygulanması Ansys Workbench 2022.R1 yazılımının LS-Dyna modülünde gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellerin diğer parametrelerinin uygulanmasında ise LS-Prepost 4.7.7. (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) modülü kullanılmıştır. Son olarak, sayısal modeller Ls-Run 2022.R1 (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) modülünde çözülmüştür. Sayısal modellere uygulanan 10 mm değerindeki basınç deplasmanına karşılık gelen yük değerinden kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerini altındaki alanlar hesaplanarak yapıların enerji yutma kapasitesi belirlenmiş ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Bu yapıların davranışları, kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri ile birlikte yapılardaki von Mises gerilme dağılımları dikkate alınarak karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Daha sonra bu yapılardan, en yüksek dayanıma ve enerji yutma kapasitesine sahip olan birer dolgulu öksetik ve geleneksel kafes yapı seçilerek, kafeslerin birim hücre kalınlıklarının ve boyutlarının kompozit yapıların mekanik davranışları üzerinde etkisi parametrik bir çalışma yapılarak incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Jin et al (2017), reaktif pudra beton plaklar, 2B re-entrant ve 2B honeycomb birim hücreli kafesler ve reaktif pudra betonu ile doldurulmuş 2B re-entrant ve 2B honeycomb birim hücreli kafes yapıların balistik direncini ve enerji yutma kapasitelerini sayısal tabanlı simülasyonlarla incelemiştir. Yapıların deformasyon ve göçme modları detaylı olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Reaktif pudra betonu ile doldurulmuş kafes yapılar, normal reaktif pudra beton plakalardan ve dolgunsuz kafes yapılardan daha iyi balistik direnç ve enerji yutma kapasitesi göstermiştir. Ayrıca, re-entrant birim hücreli kafes yapıların honeycomb birim hücreli kafes yapılardan daha iyi bir balistik performansa sahip olduğu görülmüştür. Kafes yapılar; düz, yarım küre ve konik burunlu olmak üzere üç çeşit merminin darbesine maruz bırakılmıştır. Düz burunlu merminin balistik limiti en yüksekken, konik ve yarım küre burunlu mermilerin balistik limitinin hemen hemen aynı olduğu, bununla birlikte yarım küre burunlu merminin balistik limitinin, konik burunlu merminin balistik limitinden biraz daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, reaktif pudra betonu ile dolgulu re-entrant birim hücreli kafeslerin en iyi dayanım ve balistik performans verdiği, mermilerde yapılan parametrik çalışmalarda ise daha sivri uçlu mermilerin diğer mermilere göre daha iyi delme sağladığı ve zırlarda kütle kaybı meydana getirdiği ifade edilmiştir.

Li et al. (2018), elastomer dolgulu iki tip öksetik ve iki tip geleneksel davranışa sahip dört farklı kafes kompozit yapı ve dolgunsuz dört farklı kafes yapının aksenal basınç etkisindeki davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. 3B baskı yöntemiyle üretilen bu kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kompozit yapıların göçme modları, simülasyonlar ile daha detaylı bilgi edinmek için incelenmiştir. Elde edilen verilerde, dolgulu re-entrant kafesli kompozitin en yüksek enerji yutma kapasitesine ve en büyük dayanıma sahip olduğu görülmüştür. En düşük enerji yutma kapasitesi ve dayanım, geleneksel davranış sergileyen 45° döndürülmüş kare ızgara şeklindeki kafesli kompozitte görülmüştür. Ayrıca kompozit yapılarda, takviyenin hacim oranı arttıkça yapının dayanımının ve enerji yutma kapasitesinin de arttığı sayısal analizlerle belirlenmiştir.

Rosewitz et al. (2019), çimento harcından elde edilmiş kontrol yapısını, polimer lif takviyeli çimento harcı yapısını ve çimento harcı dolgulu polimer malzemedan üretilen iki boyutlu birim hücreye sahip birbirinden farklı üç kafes yapısını üretmiş ve incelemiştir. Kompozit ve polimer lif takviyeli yapılarda kullanılan polimer miktarı hacimsel olarak yaklaşık eşit olacak şekilde tasarlanmıştır. Üç kafes yapı, sırasıyla re-entrant birim hücreden, öksetik yapıya sahip tübüler birim hücreden ve tuğla örgü tipindeki dikdörtgenlerden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Birim hücrelerden hem giriş yapılar hem de küp yapılar üretilmiş ve dolgu malzemesi ile doldurulmuştur. Beş giriş yapı, dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, en yüksek dayanımın çimento harcı dolgulu tuğla örgü tipindeki kafes yapıda olduğu görülmüş, kırılma olmadan en fazla birim uzamanın çimento harcı dolgulu tübüler kafes yapıda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, polimer lif takviyeli çimento harcı yapısı ve kontrol yapısı yaklaşık aynı dayanıma sahip olmalarına rağmen polimer lif takviyeli yapı daha fazla birim uzama göstermiştir. Beş küp yapı eksenel basınç testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlarda, polimer lif takviyeli yapının diğer yapılardan daha düşük dayanıma sahip olduğu görülürken diğer yapıların yaklaşık olarak aynı dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte çimento dolgulu kafes yapıların daha yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesi gösterdiği saptanmıştır. Son olarak, yapıların daha yüksek dayanım ve süneklik göstermesi için polimer yapı yerine daha rijit bir malzeme ve çimento harcı ile daha iyi aderans gösteren bir malzemenin tercih edilmesi önerilmiştir.

Xue et al. (2019), iki farklı polimer malzeme ile dolgulu alüminyumdan üretilmiş üç boyutlu re-entrant birim hücreye sahip öksetik kafes yapıları deneysel ve sayısal olarak incelemiş ve karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçları, iki farklı polimer malzemedan eksenel basınç dayanımı daha yüksek olan dolgu malzemesi ile dolgulu öksetik yapının dayanımının en yüksek olduğunu göstermiştir ancak, bu yapının öksetikliğinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Deneysel verilerle doğrulanan sayısal modellerde, üç boyutlu re-entrant birim hücreye sahip öksetik kafes yapının, birim hücre kalınlığının değiştirilmesiyle elde edilen yapıların öksetikliği ve dayanımları karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlara göre oluşturulan yeni modellerde, öksetik kafes yapıların birim hücre kalınlığı arttıkça hem öksetik kafes yapının hem de dolgulu öksetik kafes yapıların dayanımı artmış, fakat bu artışlar doğrusal şekilde

gerçekleşmemiştir. Ayrıca tüm yapılarda öksetik davranışın giderek düştüğü görülmüştür. Nihai olarak, polimerle dolgulu alüminyumdan üretilmiş kafes yapıların dolgusuz kafes yapılara kıyasla daha yüksek elastisite modülüne, basınç dayanımına ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

Airoldi et al. (2020), öksetik davranışa sahip polimerik hexa-chiral kafes yapısını üç boyutlu baskı teknolojisi ile üretmiş ve bu kafes yapıyı poliüretan köpükle doldurarak spesifik enerji yutma kapasitesinin araştırılması için yarı-statik ve dinamik sertlik testine tabi tutmuştur. Bu kompozit yapının enerji yutma kapasitesinin, ayrı ayrı teste tabi tutulan öksetik kafes ve poliüretan köpüğün enerji yutma kapasitelerinin toplamından önemli ölçüde fazla olduğu görülmüştür. Deneylerle doğrulanmış sayısal modellerde, hexa-chiral kafesin yapı malzemesi olarak deneylerde kullanılan polimer yerine metal malzeme tanımlanmıştır. Bu sayısal modellerinde yardımıyla, yapının basınç altında göçme olmadan en fazla büzülebilmesini sağlayacak bir geometri elde edebilmek için bir genetik algoritma optimizasyonu geliştirilmiştir. Son aşamada, optimize edilmiş yeni kafes yapı, hexa-chiral kafes yapı ile kıyaslanmıştır. Dolgulu optimize edilmiş kafes yapının, dolgulu hexa-chiral kafes yapıdan daha yüksek spesifik enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür ve ayrıca, köpük dolgu maddesinin, sünek metal malzemedan yapılmış kafeslerle daha uyumlu çalıştığı ifade edilmiştir.

Madke and Chowdhury (2020), öksetik kompozitler üzerine iki farklı sayısal inceleme yapmışlardır. İlk çalışmada, yüzey kısmı alüminyum levhadan çekirdeği ise köpük alüminyumdan oluşan sandviç kompozit yapı ile yüzey kısmı yarı öksetik lif örgüden, çekirdek kısmı ise iki farklı yönde tasarlanmış 3B re-entrant birim hücreli iki farklı çekirdeğe sahip sandviç kompozitler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, üç sandviç kompozit yapının çentik açıcıya maruz bırakılmasıyla, kompozit yapıların kinetik enerji yutma kapasitelerinin kıyaslanmasından oluşmaktadır. İkinci çalışmada ise silisyum karbür seramik, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve iki kompozit yapı (takviye kısmı iki farklı yönde tasarlanmış 3B re-entrant birim hücreli 2 kafes yapı, matris kısmı ise ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) tasarlanmış ve bu dört farklı yapının, darbe etkisi altındaki kinetik enerji yutma kapasiteleri sayısal analizlerle karşılaştırılmıştır. İlk çalışma sonucunda, çekirdek kısmı 3B re-entrant birim hücreden oluşan sandviç kompozitlerin çekirdek kısmı köpük alüminyumdan oluşan sandviç

kompozitten daha yüksek kinetik enerji yuttuğu görülmüştür. İkinci çalışmanın sonuçlarında ise takviye kısmı re-entrant birim hücreli kompozitler ve silisyum karbür seramiğin hemen hemen aynı seviyede kinetik enerji yuttuğu gözlemlenirken, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen yapının bu yapılara göre daha az kinetik enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Peng et al. (2020), birim hücresi 2B re-entrant olan bir kompozit kafes yapının dolgu ve kafes yapısında kullanılan malzemelerin elastisite modülünün yapının genel öksetikliğine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışma, sayısal modeller kullanılarak yapılmıştır. Yapılara eksenel mikro yüklemeler uygulanmış ve bu yapıların elastik bölgedeki deformasyonları incelenmiştir. Kafes için kullanılan malzemenin elastisite modülü “ E_r ”, dolgu için kullanılan malzemenin elastisite modülü “ E_d ” ile ifade edilmiştir. E_r/E_d değeri 10^{-2} 'den küçük ya da 10^2 'den büyük olduğunda yapı öksetik davranış göstermiş, E_r/E_d değeri 10^{-2} ile 10^2 arasında olduğunda ise yapının geleneksel davranış sergilediği tespit edilmiştir. Farklı bir şekilde ifade edildiğinde kafes yapı için kullanılan malzeme, dolgu için kullanılan malzemeden çok daha rijit ya da tam tersi dolgu için kullanılan malzeme, kafes yapı için kullanılan malzemeden çok daha rijit ise eksenel mikro yüklemeler altında yapının öksetik davranış gösterdiği görülmüştür. Dolgu malzemesinin ve kafes yapı için kullanılan malzemenin rijitliği birbirine yakınsa yapının geleneksel davranış sergilediği belirlenmiştir. Nihai olarak, mikro boyuttaki yüklemelerin ve kullanılan malzemelerin, kompozit yapının öksetikliğini değiştirdiği belirtilmiştir.

Wang et al. (2020), öksetik davranış sergileyen 2B yıldız şekilli bal peteği birim hücresine sahip kafes yapılar tasarlamıştır. Bu yapıların tasarımları, kafeslerin tamamı dolgulu, sadece yıldızların içi dolgulu ve sadece yıldızların dışı dolgulu olacak biçimde geliştirilmiş ve bu üç yapı sayısal olarak incelenmiştir. İncelemede, bu üç yapı için, dolgu malzemesinin elastisite modülünün öksetik kafes yapının elastisite modülüne oranı (E_R) değiştiğinde, yapının genel öksetikliğinin nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Sayısal sonuçlarda, yıldızların sadece dışı dolgulu olduğu durumda, $E_R = 10^{-8}$ iken yapının Poisson oranı -0,5 olarak hesaplanmış, $E_R = 10^{-4}$ olduğunda Poisson oranı -0,65'e kadar düşmüş ve E_R değeri 1'e yaklaştıkça yapının Poisson oranının da 0'a yaklaştığı görülmüştür. Yıldızların sadece içi dolgulu olduğu durumda; $E_R = 10^{-8}$ iken

yapının Poisson oranı $-0,5$, $E_R = 10^{-4}$ olduğunda Poisson oranı $0,4$ ve E_R değeri 1 'e yaklaştıkça Poisson oranının da tekrar azalarak 0 'a kadar düştüğü tespit edilmiştir. Tüm kafes yapının içi dolgulu olduğu durumda; $E_R = 10^{-8}$ 'den 1 'e yaklaştıkça Poisson oranının da giderek arttığı gözlenmiştir. Ayrıca çalışmada, en yüksek enerji yutma kapasitesi, yıldızların dışı dolgulu olduğu durumda saptanmışken, en düşük enerji yutma kapasitesinin ise yıldızların sadece içi dolgulu olduğu durumda görüldüğü ifade edilmiştir.

Yu et al. (2020), alüminyum alaşımlı üç adet 2B re-entrant birim hücreyi, geleneksel elektro erozyon yöntemi ile üretmiştir. İmalat aşamasında yapılardan birinin ortasında destek çubuğu bırakılmış, birinin ise iç kısmı poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Bu üç numune eksenel basınç testine tabi tutulmuş ve deney sonuçları, içi boş birim hücre ve orta kısmı desteklenmiş birim hücre yapısının spesifik enerji yutma kapasitesinin birbirine yakın olduğu göstermiştir. Köpük dolgulu öksetik yapının ise diğer yapılara kıyasla iki kattan daha fazla spesifik enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu görülmüştür. Çalışmada, basınç etkisinde büzülen yapıda, yapı içindeki köpüğün iki ekseninde sıkışması sonucunda bu artışın meydana geldiği belirtilmiştir. Ayrıca incelemede, doğrulanmış sayısal modellerle, yapıların deformasyon modları incelenmiş ve boyut etkisi araştırılarak elde edilen verilerden bir yapı topolojisi önerilmiştir.

Zhou et al. (2020), alüminyum malzemeden 2B re-entrant birim hücreye sahip öksetik kafesler üretmiş, daha sonra bu kafes yapıları farklı mukavemette ve farklı yoğunluktaki köpük betonlar (hafif beton) ile doldurmuştur. Elde edilen bu yapılar yarı-statik ve dinamik eksenel basınç testine tabi tutulmuş, ayrıca sayısal analizlerle incelenmiştir. Köpük beton dolgulu öksetik kafeslerin göçme modları, basınç dayanımı ve enerji yutma kapasiteleri araştırılmıştır. Deney sonuçlarında, köpük beton yoğunluğu arttıkça, dolgulu öksetik kafeslerin göçme modlarının basınç kırılmasından kesme kırılmasına doğru değiştiği gözlenmiştir. Basınç kırılması düşük tepe dayanım ve sabit plato gerilimi sergilerken, kesme kırılması yüksek tepe dayanım ve ciddi şekilde dalgalanan plato gerilimi sergilemiştir. Doğrulan sayısal analizlerde, yükleme hızı büyük olduğunda, yükleme ucuna yakın bölgede yerel deformasyonlar görülürken; yükleme hızının orta ve yarı-statik olduğu durumda yapıda genel bir deformasyon

oluştugu gözlenmiştir. Köpük beton dolgulu kafeslere uygulanan sıkıştırma hızı arttıkça yapının hem dayanımının hem de enerji yutma kapasitesinin arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, öksetik kafesin duvar kalınlığıyla ilgili yapılan parametrik çalışmalarda, kafesin duvar kalınlığı arttıkça yapının tepe dayanımının ve öksetikliğinin arttığı görülmüştür.

Albertini et al. (2021), hiper elastik polimerik malzeme dolgulu öksetik kafeslerin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal yaklaşımlarla incelemiştir. Öksetik kafeslerin birim hücresi olarak Hexaround ve Warmuth hücreleri seçilmiştir. Yapıların etkili elasto-mekanik özellikleri, periyodik sınır koşulları ile bir homojenleştirme stratejisi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Sayısal modeller deneysel veriler ile doğrulanmış ve kafes ve matrisin farklı hacim yüzdeleri için öksetik kafesler ve dolgulu kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kafeslerin doldurulmasıyla yapının elastisite modülünün, maksimum dayanımının ve plato kuvvetinin artırılabilceğini, dolayısıyla dolgu malzemesinin spesifik enerji yutma kapasitesini iyileştirilebileceğini göstermiştir. Dolgu malzemesinin kullanılması, yük altındaki kafes yapının dolgusuz durumda oluşabilen göçme modlarını engellemesiyle, yapının mukavemetini önemli ölçüde artırmıştır. Çalışmada, yüksek enerji yutma kapasitesi için kullanılan yapılara, yeni bir tasarım ilkesi eklendiği ifade edilmiştir.

Farrokhhabadi et al. (2021), re-entrant birim hücreli öksetik kafesleri, eriyik biriktirme tabanlı 3B baskı teknolojisiyle iki farklı malzeme kullanarak üretmiş ve kafeslerin bir kısmını poliüretan köpük ile doldurmuştur. Hem içi boş kafes yapıların hem de köpük dolgulu kafes yapıların enerji yutma kapasitelerinin araştırılması için deneysel, analitik ve sayısal bir inceleme yapılmıştır. Deneysel verilerle, kafes yapılar ve kompozit yapılar karşılaştırıldığında, kafes yapıların üretiminde polilaktik asit kullanıldığında, köpük dolgulu kafesin dolgusuz kafes yapıya göre %20 oranında daha fazla enerji yuttuğu ve kafes yapıların üretiminde poliamid kullanıldığında ise köpük dolgulu kafesin dolgusuz kafes yapıya göre yuttuğu enerjinin %70 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, yapının mekanik ve geometrik özelliklerinin, yapının kırılma gerilmesi ve enerji yutma kapasitesini nasıl etkilediğini belirlemek için olasılıksal tabanlı analitik bir model geliştirilmiştir.

Okumura et al. (2021), birim hücresi re-entrant, honeycomb ve tuğla örgü tipindeki dikdörtgenlerden oluşan kafesleri, ilk önce 3B yazıcı ile üretmiş ve daha sonra silikon ve kauçuk çözeltisi birleştirerek elde etmiş oldukları dolgu malzemesini bu kafes yapıların içine dökmüştür. İncelemede, kompozit yapıda silikon kauçuk çözeltisi matris, kafes yapının ise takviye görevi gördüğü ifade edilmiştir. Elde edilen numuneler aksenal çekme testine maruz bırakılmış, sertlik, göçme yükü ve uzama miktarları deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, elde edilmiş kompozitlerin makro ölçekli çift ağlar türünde olduğu belirtilerek bu yapıları göçme modları ve maksimum dayanım kriterleri araştırılmıştır. Bu kompozitlerinde istenen durum matrinden önce takviye elemanının kırılması ve parçalanmasıdır. Deneysel çalışmalar, kullanılan matris malzemesinin Poisson oranının ve takviye yapısının Poisson oranının negatif ya da pozitif olmasına bakılmaksızın, yapıların Poisson oranları arasındaki fark ne kadar büyürse yapının maksimum dayanımının da o kadar büyüyeceğini göstermiştir. Araştırmada, kafes yapının Poisson oranı ile dolgu malzemesinin Poisson oranı arasındaki fark ne kadar büyük olursa, makro ölçekli çift ağlar kompozitleri için daha iyi bir tasarım elde edileceği ifade edilmiştir.

Xue et al. (2021), birim hücre kalınlığı 0,8 mm, 1 mm ve 1,2 mm olan üç boyutlu re-entrant birim hücreli öksetik kafesleri üretmiş ve iki farklı polimer dolgu malzemesi ile doldurmuştur. Oluşan altı farklı yapı, boş kare tüpler içine konulmuştur. Elde edilen yapı en dışta kare tüp, içinde ise polimer dolgulu 3B öksetik kafes yapıdan oluşmaktadır. Çalışmada, üç parçadan oluşan kompozit yapının, malzemeleri ayrı ayrı incelediğimizde basınç etkisi altında enerji yutma kapasitelerinin toplamı ile bu üç parçadan oluşan kompozit yapının enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deney sonuçlarında, öksetik kafes yapının birim hücre kalınlığı, 1 mm olduğunda en yüksek enerji yutma kapasitesi gözlenmiş, birim hücre kalınlığı 0,8 mm olduğunda ise en düşük enerji yutma kapasitesi gözlemiştir. Ayrıca, deneysel ve sayısal modellerde, öksetik kompozit dolgulu tüplerin hem boş tüp hem de öksetik kompozitlerle karşılaştırıldığında, boş tüp ve öksetik kompozit yapıların toplam enerji yutma kapasitelerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür. Üç parçadan oluşan yeni yapıda, yapının parçalarının birbirlerini destekleyerek istenmeyen göçme modlarını engellediği, yapının mukavemetini ve enerji yutma kapasitesini artırdığı görülmüştür.

Lan et al. (2022), birim hücresi 2B re-entrant olan kafes yapıları, 3B baskı ve basınçlı köpürtme yöntemi ile üretmiş ve poliüretan köpük ile doldurmuştur. Köpük dolgulu kafes yapılar ile dolgunsuz kafes yapıların aksel basınç yükü altındaki davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, dolgulu kafes yapıların enerji yutma kapasitelerinin dolgunsuz kafes yapılara kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Farklı sıkıştırma hızları üzerine yapılan parametre çalışmalarında, köpük dolgulu kafes yapıların enerji yutma kapasiteleri sayısal olarak araştırılmış ve sonuçlarda, sıkıştırma hızı düşük olduğunda ($v < 25\text{m/s}$), ana enerji yutucu poliüretan köpük malzeme iken sıkıştırma hızı yüksek olduğunda ($v > 25\text{m/s}$), ana enerji yutucunun öksetik kafes yapı olduğu gözlenmiştir. Yapıların enerji yutma kapasitelerini arttırmak için kafes yapının boşlukları tam doldurulmayarak farklı doldurma modları önerilmiş ve incelenmiştir. Tamamı dolgulu olmayan yapılar tamamı dolgulu yapılarla kıyaslandığında, toplam enerji yutma kapasitelerinin daha düşük olduğu görülmüş, fakat bazı doldurma modlarının spesifik enerji yutma kapasitesinin, tamamı dolu yapılara göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Luo et al. (2022), birim hücresi re-entrant ve honeycomb olan kafes yapıları 3B yazıcı ile üretmiştir. Üretilen kafes yapıların yarısının içine yavaş geri kazanımlı köpük, diğer yarısının içine ise hızlı geri kazanımlı köpük konulmuş ve bu kompozitler farklı hızlarda aksel basınç testine tabi tutulmuştur. Yapıların enerji yutma kapasiteleri ve öksetiklikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deney sonuçları, yavaş geri kazanımlı köpük dolgulu re-entrant birim hücreli kafes yapının en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermiş, hızlı geri kazanımlı köpük dolgulu honeycomb birim hücreli kafes yapının ise en düşük enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymuştur. En iyi öksetiklik ise hızlı geri kazanımlı köpük dolgulu re-entrant yapılarda gözlenmiştir. Bu sonuçlar göz önünde alındığında deneysel çalışmalarla doğrulanan sayısal modellerin, en yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olan yavaş geri kazanımlı köpük dolgulu re-entrant kafes yapı üzerinde yapılması tercih edilmiştir. Re-entrant birim hücresinin duvar kalınlığı ve hücre açısıyla ilgili yapılan parametrik çalışmalarda hücre duvarı kalınlığı ve hücre açısı arttıkça kompozit yapının enerji yutma kapasitesinin ve öksetikliğinin arttığı görülmüştür. Çalışmada, dolgulu öksetik kompozitlerin koruyucu mühendislik alanında yeni yapılara ilham olabileceği vurgulanmıştır.

Luo et al. (2022), beton dolgulu, üç adet farklı yüzeye sahip boru şeklindeki yapının aksenal basınç etkisi altında kuvvet-deformasyon eğrilerini incelemiş ve yapıların taşıma kapasitesini, tokluğunu ve sünekliliğini araştırmıştır. Bu üç beton dolgulu yapı aynı hacimde tasarlanmış ve bu yapıların geometrileri; deliksiz düz boru, öksetik olmayan delikli boru ve öksetik davranışa sahip boru şeklinde imal edilmiştir. Deneysel sonuçlarında, beton dolgulu düz borunun en yüksek maksimum kuvvet ve tokluk değerine sahip olduğu görülürken, beton dolgulu öksetik olmayan delikli borunun ise en düşük taşıma kapasitesi ve tokluk değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Doğrulanmış sayısal modellerle, beton dolgulu yapının boru kalınlığı ve boru biçimindeki yapının Poisson oranı değiştirildiğinde yapının maksimum kuvvet, tokluk ve sünekliliği gibi özelliklerinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Sonuç olarak, yapıda kullanılan boru kalınlığı arttıkça ve boru biçimindeki yapının Poisson oranı azaldıkça yapının taşıma kapasitesinin, tokluğunun ve sünekliliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Ren et al. (2022), öksetik tüplerin ve sert poliüretan köpük dolgulu öksetik tüplerin spesifik enerji yutma kapasitelerini ve Poisson oranlarını, deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. İki farklı birim hücre ve her bir birim hücre için iki farklı kalınlığa sahip dört farklı öksetik boru üretilmiştir. Köpük dolgulu öksetik borularla birlikte toplamda sekiz farklı numune üretilmiş ve bu numuneler aksenal basınç testine tabi tutulmuştur. Köpük dolgulu öksetik boruların spesifik enerji yutma kapasitesinin dolgunsuz öksetik borulara kıyasla iki kat daha fazla olduğu görülmüş fakat dolgu malzemesi, yapının öksetikliğini azaltmıştır. Deneysel verilerle doğrulanmış sayısal modellerle köpük dolgulu öksetik borularda, boru kalınlığının etkisini incelemek için parametrik çalışmalar yapılmış ve köpük dolgulu öksetik boruda boru kalınlığı arttıkça yapının spesifik enerji yutma kapasitesinin ve yapının öksetikliğinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, borulara öksetik davranış özelliğini veren eliptik birim hücrelerde, eliptik şekli oluşturan minimum çapın maksimum çapa oranı üzerine yapılan parametrik çalışmalarda, yapının spesifik enerji yutma kapasitesinin bu orandan etkilendiği belirlenmiştir.

Tzortzinis et al. (2022), betondan oluşan donatısız kontrol numunesinin, geleneksel betonarme yapının ve birim hücresi 3B re-entrant olan beton dolgulu kafes yapısının aksenal basınç altındaki davranışını ve dayanımını incelemiştir. Çalışmada, geleneksel betonarme yapılarda, boyuna ve enine donatıların basınç altındaki çekirdek betonun yanal genişlemesini küçükte olsa engelleyerek pasif bir yanal tutulma sağladığı ve bu şekilde yapının mukavemetinin önemli ölçüde arttığı ifade edilmiştir. Öksetik kafeslerde ise geleneksel betonarme yapıda olduğu gibi hem pasif bir yanal tutulma hem de basınç altındaki büzülme davranışından dolayı betonun yanal genişlemesine engel olarak daha aktif bir yanal tutulma sağladığı vurgulanmıştır. Bu durum betonun matris, 3B birim hücreye sahip kafes yapının ise takviye olduğu kompozit bir yapı oluşturmaktadır. Elde edilen yeni kompozit yapı ile geleneksel betonarme yapı aksenal basınca maruz bırakılmış ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları, betonla birleştirilen öksetik kafesin basınç dayanımının donatısız betondan oluşan kontrol numunesinin basınç dayanımının iki katından daha fazla olduğunu ve yapıların gerinim değerleri karşılaştırıldığında ise farkın neredeyse on kata yakın olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada, yeni kompozit yapının dayanımının geleneksel betonarme yapının dayanımına göre %50 daha fazla olduğu görülmüştür. Deneysel verilerle doğrulanmış sayısal modeller kullanılarak, 3B re-entrant birim hücre açıları üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan sayısal analiz sonuçlarında, açısal parametrelerle elde edilen betonla birleştirilmiş öksetik ve geleneksel kafes yapılar karşılaştırıldıklarında, betonla birleştirilen öksetik kafeslerin basınç dayanımının daha yüksek olduğu gözlemlenirken, betonla birleştirilen geleneksel kafeslerin çekme dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, beton dolgulu öksetik kafes yapının, geleneksel betonarme yapılara göre iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

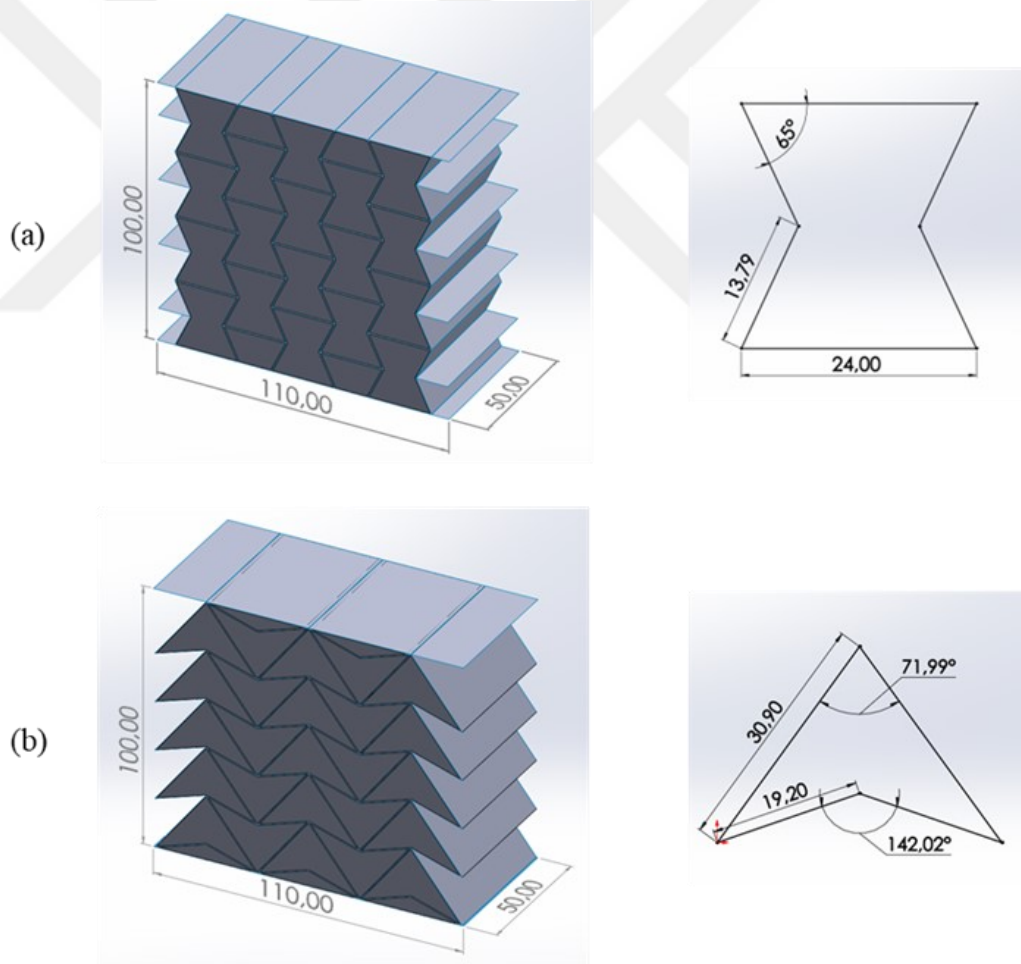
Bu bölümde, beton dolgulu öksetik (BDÖ) ve beton dolgulu geleneksel (BDG) kompozitlerin tasarımları, rölatif yoğunlukları, sayısal modellerin doğrulama çalışması, sayısal modellerin parametreleri ve son olarak alüminyum kafes yapıların Poisson oranlarına yer verilmiştir.

3.1. BDÖ Kompozit Yapıların Tasarımları

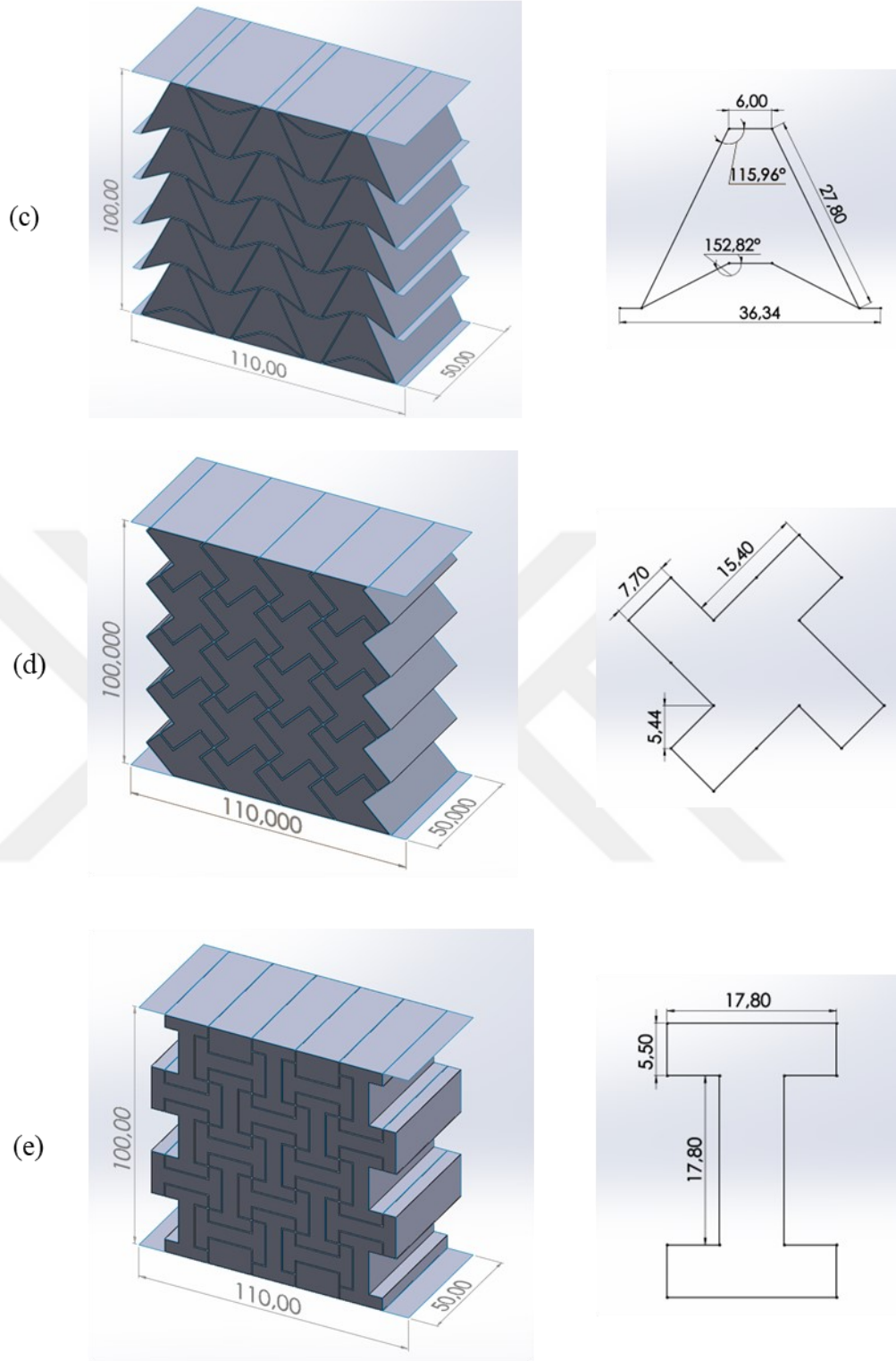
Öksetik yapıların birim hücrelerinin genel geometrileri literatürde yer alan çalışmalara uygun olarak belirlenmiştir. Bu birim hücrelerden re-entrant için Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışma, arrowhead yapısı için Usta et al. (2021), yeni arrowhead yapısı için Ma et al. (2018), lozenge grid yapısı için Elipe ve Lantada (2012), formed from square grid yapısı için Elipe ve Lantada (2012) ve star honeycomb yapısı için de Yanping ve Hong (2010) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır. Öksetik birim hücrelerin şekilleri birbirlerinden oldukça farklı olduğu için tasarımlar, yapıların genel boyutlarının ve kafeslerin rölatif yoğunluklarının birbirine yakın olması dikkate alınarak Solidworks ortamında gerçekleştirilmiştir. Her bir kafes yapının genel boyutları, taban alanı $110 \times 50 \text{ mm}^2$, yüksekliği 100 mm olacak ve kafes yapıların rölatif yoğunlukları ise %7,5 ($\pm 0,2$) olacak şekilde tasarlanmıştır. Beton dolgulu öksetik kafesler, birim hücrelerine şekillerine göre re-entrant “BDÖ-RE”, arrowhead “BDÖ-AH”, yeni arrowhead “BDÖ-YAH”, lozenge grid “BDÖ-LG”, formed from square grid “BDÖ-FFSG”, star honeycomb “BDÖ-SH” olarak kısaltılmıştır. BDÖ kompozit yapıların ve öksetik kafeslerin birim hücrelerin boyutları Şekil 3.1’de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 3.1’de de BDÖ kompozitlerin geometrik özellikleri, öksetik kafeslerin rölatif yoğunlukları ve yapılarıdaki beton dolguların rölatif yoğunlukları verilmiştir. Kafes yapıların birim hücre kalınlıkları çok düşük olduğu için yüzey olarak, beton kısımlar ise katı cisim olarak tasarlanmıştır.

Çizelge 3.1. BDÖ kompozitlerin geometrik özellikleri

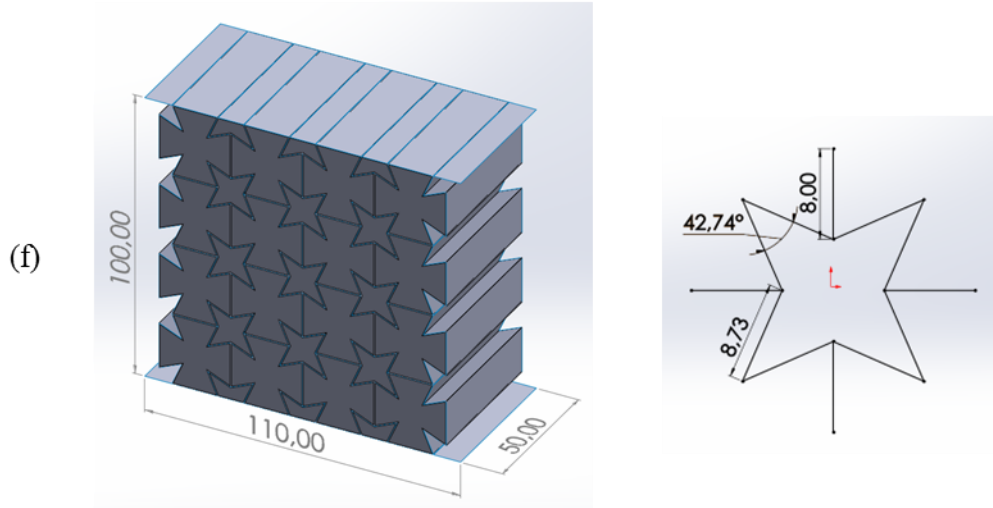
Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Kafes Hacim (mm ³)	Beton Hacim (mm ³)	Kafes Rölatif Yoğunluk (%)	Beton Rölatif Yoğunluk (%)
BDÖ-RE	0,6	41.581	423.100	7,56	76,93
BDÖ-AH	0,45	40.495	422.106	7,36	76,75
BDÖ-YAH	0,5	40.964	421.348	7,45	76,61
BDÖ-LG	0,65	42.462	401.604	7,72	73,02
BDÖ-FFSG	0,45	41.427	400.511	7,53	72,82
BDÖ-SH	0,45	41.619	437.432	7,57	79,53



Şekil 3.1. BDÖ kompozitlerin ve öksetik birim hücrelerin boyutları: (a) BDÖ-RE; (b) BDÖ-AH; (c) BDÖ-YAH; (d) BDÖ-LG; (e) BDÖ-FFSG; (f) BDÖ-SH (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).



Şekil 3.1. (devam)



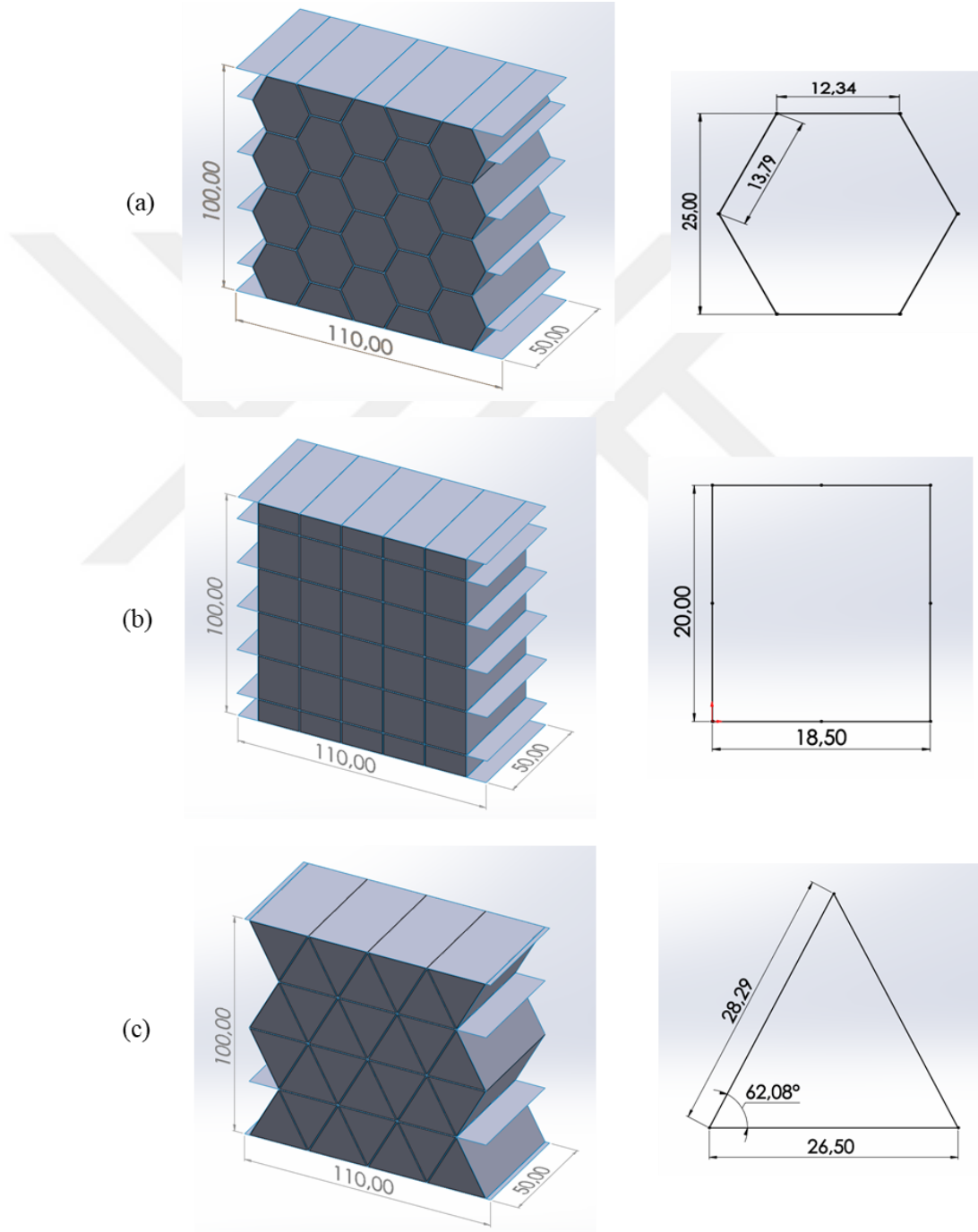
Şekil 3.1. (devam)

3.2. BDG Kompozit Yapıların Tasarımları

Geleneksel kafes yapıların birim hücrelerinin genel geometrileri mevcut literatür çalışmaları referans alınarak belirlenmiştir. Bu birim hücrelerden honeycomb için Basurto-Vázquez et al. (2021) tarafından yapılan çalışma, isogrid yapısı için Ehsani ve Dalir (2019) ve rectangle grid yapısı içinde Chowdhury (1985) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır. BDÖ kompozitlerin tasarımlarında da yapıldığı gibi, tasarımlar yapıların genel boyutlarının ve kafeslerin rölatif yoğunluklarının birbirine yakın olması dikkate alınarak Solidworks ortamında gerçekleştirilmiştir. Her bir kafes yapının genel boyutları, taban alanı $110 \times 50 \text{ mm}^2$ yüksekliği 100 mm olacak ve kafes yapıların rölatif yoğunlukları ise yaklaşık %7,3 ($\pm 0,3$) olacak biçimde tasarlanmıştır. Beton dolgulu geleneksel kafesler, birim hücrelerine şekillerine göre Honeycomb “BDG-HC”, isogrid “BDG-IG” ve rectangle grid “BDÖ-RG” olarak kısaltılmıştır. BDG kompozit yapıların ve geleneksel kafeslerin birim hücrelerin boyutları Şekil 3.2’de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 3.2’de BDG kompozitlerin geometrik özellikleri, geleneksel kafeslerin rölatif yoğunlukları ve yapılardaki beton dolguların rölatif yoğunlukları verilmiştir. Öksetik yapılarda olduğu gibi, kafes yapıların birim hücre kalınlıkları çok düşük olduğundan bu kafes yapı kısımları yüzey olarak, beton kısımlar ise katı cisim olarak tasarlanmıştır.

Çizelge 3.2. BDG kompozitlerin geometrik özellikleri

Geleneksel Kafesler	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Kafes Hacim (mm ³)	Beton Hacim (mm ³)	Kafes Rölatif Yoğunluk (%)	Beton Rölatif Yoğunluk (%)
BDG-HC	0,7	39.941	425.079	7,26	77,29
BDG-IG	0,55	39.694	432.312	7,22	78,60
BDG-RG	0,6	41.250	431.390	7,50	78,43



Şekil 3.2. BDG kompozitlerin ve geleneksel birim hücrelerin boyutları: (a) BDG-HC; (b) BDG-RG; (c) BDG-IG (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).

3.3. Sayısal Modeller (Sonlu Elemanlar Analizleri)

Sonlu elemanlar yöntemi, başlangıçta yapılara uygulanan yüklere bağlı olarak, yapılarda oluşan deplasmanların hesaplanması için kullanılan bir matematiksel metottur. Bu yöntem kısaca, bir yapıyı kendinden oldukça küçük ağ elemanlarına (tetrahedron, prizma, hexahedron vb.) bölerek elde edilen parçaların matematiksel matrislere dönüştürülmesi ve çözülmesinden oluşan yaklaşık bir yöntemdir (Gupta and Meek 1996). Geliştirilen bu yöntem deplasmanların hesaplanması dışında, Nastran, Ansys ve LS-Dyna gibi sonlu eleman tabanlı yazılımlarla da desteklenerek birçok mühendislik alanında da farklı amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır (Sabat and Kundu 2021).

Bu çalışmada incelenen kompozit yapıların mekanik özelliklerinin nümerik olarak belirlenmesinde de sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir yazılım olan LS-Dyna kullanılmıştır.

3.3.1. Sayısal modellerin doğrulama çalışması

Çalışma kapsamında oluşturulan sayısal modellerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, daha önce Zhong et al. (2022) tarafından deneysel ve nümerik olarak incelenen re-entrant birim hücreli ve beton dolgulu kafes bir yapı modellenerek analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar ilgili çalışmanın bulguları ile kıyaslanmıştır.

Doğrulama çalışmasında kullanılacak modelin oluşturulması iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda yapının Solidworks ortamında tasarımı yapılmıştır. Sonrasında, analizlerde dikkate alınacak sonlu eleman ağı tipi ve boyutu ile birlikte yapının malzeme özellikleri ve takviye, matris ve rijit plaka arasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Solidworks ortamından tasarlanan sayısal analizlerin doğrulama çalışması modeli parasolid (.x_t) formatında kaydedilip Ansys Workbench yazılımının LS-Dyna modülüne aktarılmıştır. Bu modülde ilk olarak, bu kompozit yapının yüzey olarak tasarlanan kafesinin kalınlık ölçüleri verilmiştir. Modelde re-entrant kafes yapısının yatay elemanları 0,8 mm, düşey elemanları ise 0,4 mm değerinde bir kalınlığa sahiptir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Daha sonra bu yapı sonlu eleman ağlarına (mesh) bölünmüştür. Kompozit yapının kafesi dörtgen kabuk (shell), beton kısmı ise altı yüzlü kübik (hexahedron) katı (solid) sonlu eleman ağı parçalarına bölünmüştür. Sonlu eleman modellerinde kübik eleman tipinin seçimi, karşılaştırmanın yapılacağı Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışma göz önüne alınarak yapılmıştır. Kompozitte, kafes yapının sonlu eleman ağı boyutları 1 mm, beton kısımların sonlu eleman ağı boyutları ise 2 mm olarak uygulanmıştır. Eleman tipi seçiminde olduğu gibi beton kısmın sonlu eleman ağı boyutu da referans alınan çalışma göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu sonlu eleman ağlarının kalitesi Ansys Workbench yazılımının içerisindeki Skewness parametresine göre değerlendirilmiştir. Bu kompozit yapının ortalama Skewness değerinin 0,1'in altında olduğu tespit edilmiş ve Çizelge 3.3'e göre yapının sonlu eleman ağının kalitesinin çok iyi düzeyde olduğu görülmüştür. Yapının sonlu eleman ağlarına bölünmesi işlemi tamamlandıktan sonra, bu model (.k) formatında kaydedilmiş ve LS-Prepost'a aktarılmıştır.

Çizelge 3.3. Skewness değerine göre eleman kalitesi (Anonymous 2022a)

Eleman Kalitesi	Skewness
Bozuk	1
Kötü	0,90-1,00
Zayıf	0,75-0,90
Vasat	0,50-0,75
İyi	0,25-0,5
Çok iyi	0,00-0,25
Eşkenar	0

Ls-Prepost'a aktarılan sayısal modelde kafes (takviye) yapıda kullanılan alüminyum malzemesini modelleyebilmek için MAT_24_PIECEWISE_LINEAR PLASTICITY kartı, dolgu (matris) için kullanılan betonu modelleyebilmek için ise MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL kartı tercih edilmiştir. Bu malzeme kartları, Zhong et al. (2022) tarafından kullanılan malzeme kartları ile aynı değildir fakat, bu durum kullanılan sonlu elemanlar programının aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorun, Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmaya referans verilerek malzemelerin mekanik özelliklerinin özelleştirilmesiyle çözülmüştür. Çizelge 3.4'te gösterilen, sayısal modelde kullanılan alüminyumun malzeme parametreleri ve

3. MATERYAL ve YÖNTEM

malzeme kartı tercihi Lan et al. (2019), Zhou et al. (2020) ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.4. Alüminyumun mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
Alüminyum 1060	2.720	0,34	274	69.000	0,69

Betonun malzeme özellikleri için tercih edilen MAT_SCHWER_MURRAY_CAP_MODEL kartı Murray ve Lewis tarafından geliştirilmiş ve toprak, beton ve kayalar modelleyebilmek için MAT_CSCM'nin (MAT_159) geliştirilmiş bir sürümü olarak ortaya konmuştur (Ltsc 2014). Bu malzeme modeli hıza bağlı dayanım, hasar mekaniği gibi plastik özelliklere sahip malzemeleri modelleyebilmek için geliştirilmiştir. Sayısal modelde kullanılan betonun mekanik özellikleri, Jiang and Zhao (2015) ile Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmalarda verilen beton parametrelerine uygun olarak özelleştirilmiş ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.

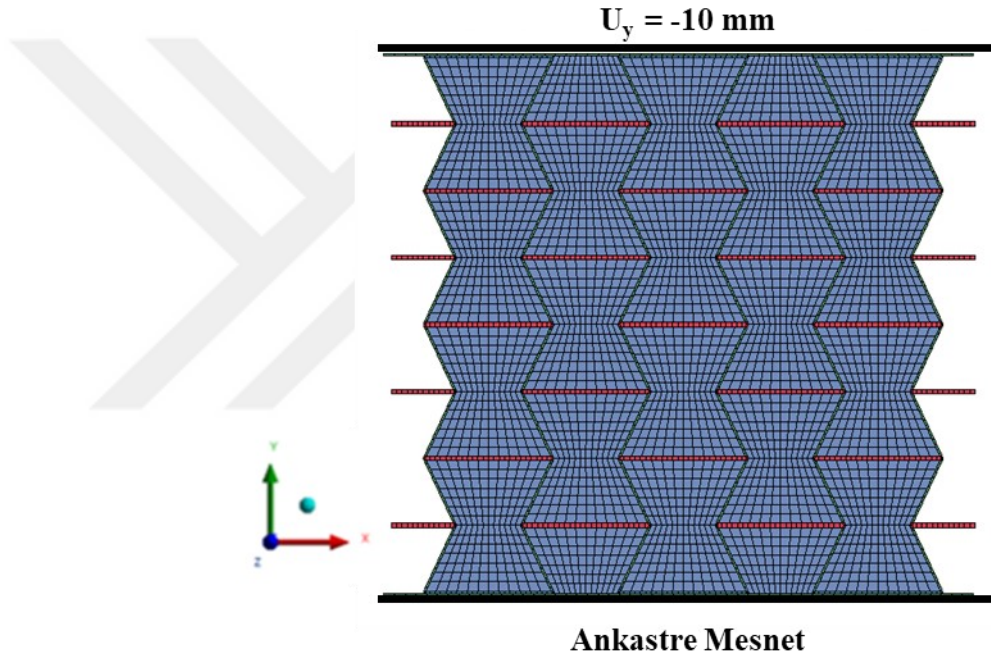
Ayrıca, kompozit yapının referans deneylerdeki sınır koşullarını oluşturabilmek için LS-Prepost'ta yapıların alt ve üst kısımlarına rijit plakalar eklenmiştir. Bu rijit plakaların mekanik özellikleri MAT_RIJID kartı ile modellenmiştir.

Çizelge 3.5. Betonun mekanik özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	2.000	kg/m ³
Poisson Oranı	0,16	-
Elastik Modülü	8.000	MPa
Kayma Modülü	3.448,3	MPa
Hacim Modülü	3.921,6	MPa
Basınç Dayanımı (f _c)	16,5	MPa
α	3,872	MPa
θ	0,30	-
γ	0,8314	MPa
β	0,1478	MPa ⁻¹
α_2	0,76	-
θ_2	0	MPa ⁻¹
γ_2	0,26	-
β_2	0,01995	MPa ⁻¹
α_1	0,82	-
θ_1	0	MPa ⁻¹
γ_1	0,02407	-
β_1	0,02315	MPa ⁻¹
X ₀	48,305	MPa
D ₁	6,11x10 ⁻⁴	MPa ⁻¹
D ₂	2,22x10 ⁻⁶	MPa ⁻²
W	0,065	-
R ₀	3,018	-
RDAM0	0,1844	MPa ^{1/2}

Yapıların birbirine temas eden yüzeyleri Zhong et al. (2022) tarafından yapılan sayısal çalışmada olduğu gibi birbirine bağlı yüzey değil, sürtünmeli yüzey tercih edilmiştir. Bu tercih, simülasyonun daha gerçekçi olmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. LS-Prepost'ta beton dolgu, alüminyum kafes ve rijit plakalar arasındaki temas bölgelerini modelleyebilmek için AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE kontak kartı tercih edilmiştir. Temas yüzeylerinde statik sürtünme katsayısı 0,3 dinamik sürtünme katsayısı ise 0,2 olarak alınmıştır. Bu değerlerin belirlenmesinde, Zhou et al. (2020) tarafından yapılan çalışma dikkate alınmıştır. Kontakla ilgili diğer parametreler programın kontrolüne bırakılmıştır.

Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi kompozit yapının alt yüzeyine yerleştirilen rijit plakanın tüm eksenlerdeki hareketleri (U_x , U_y ve U_z) ve dönmeleri (θ_x , θ_y ve θ_z) engellenmiştir. Kompozit yapının üst yüzeyi yerleştirilen rijit plakanın ise iki eksendeki hareketleri (U_x ve U_z) ve üç eksendeki dönmeleri (θ_x , θ_y ve θ_z) engellenmiş ve bu levhaya y-eksenine aşağı yönde 10 mm'lik bir basınç deplasmanı uygulanmıştır. Referans olarak alınan çalışmadan farklı olarak 30 mm deplasman yerine 10 mm deplasman tercih edilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin 10 mm deplasmandan sonra düz bir çizgi şeklinde devam etmesi, bu tercihin nedenidir. Şekil 3.3'te yapılara uygulanan sınır koşulları gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Sayısal modelin doğrulamasında kullanılan ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada incelenen re-entrant kompozit yapı.

3.3.2. Sayısal modellerde kullanılan parametreler

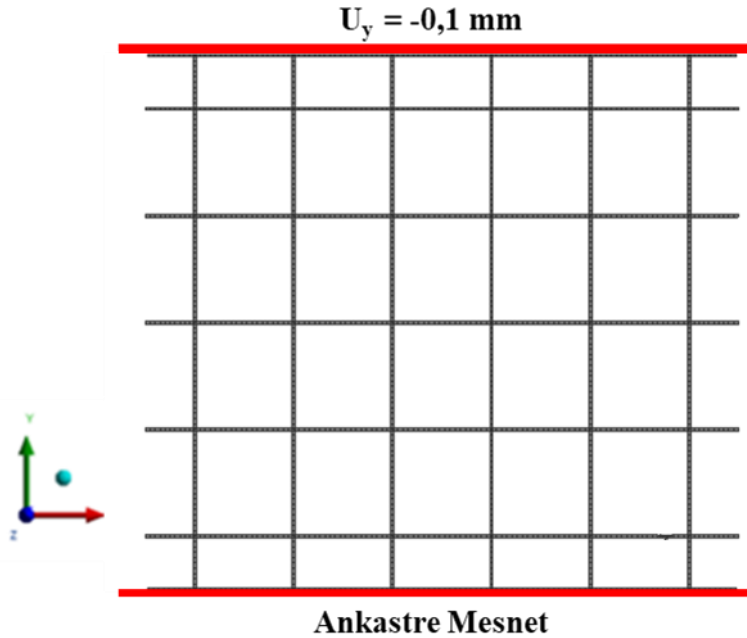
Sayısal modellerin doğrulama çalışmasında olduğu gibi, Bölüm 3.1 ve 3.2'de ifade edilen kompozit yapılar, Solidworks ortamında tasarlanıp parasolid (.x_t) formatında kaydedilip Ansys Workbench yazılımının LS-Dyna modülüne aktarılmıştır.

Tüm dolgulu kafes yapıların, sonlu eleman ağlarının boyutu, sonlu eleman ağlarının tipi, modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, sürtünme

katsayıları ve sınır koşulları sayısal modellerin doğrulama çalışmasında kullanılan parametrelerle aynı alınmıştır.

3.3.3. Kafes yapıların poisson oranları ve direngenlikleri

Kompozit yapılarda kullanılan öksetik ve geleneksel kafes yapıların Poisson oranları ve direngenlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla Ansys Workbench yazılımının Static Structural modülünde analizler gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1 ve 3.2’de ifade edilen tasarım parametrelerine göre Solidworks ortamında tasarlanan bu yapılar ve parasolid (.x_t) formatında kaydedilip ilgili analiz modülüne aktarılmıştır. Bu modülde, kafes yapının mekanik özellikleri Çizelge 3.4’te verilen değerler ile aynı alınmıştır. Sonlu eleman ağının boyutları ve tipi ise aynı kompozit yapıların kafeslerine uygulandığı gibi 1 mm boyutunda ve kabuk eleman olarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan sınır koşulları da Bölüm 3.3.1’de sayısal modellerin doğrulama çalışmasında kullanılan parametrelerle bire bir aynı olmakla birlikte yapılara uygulanan basınç deplasmanı, yapıların elastik bölgede deforme olmasını sağlamak için amacıyla 0,1 mm olarak uygulanmıştır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Kafes yapılara uygulanan sınır şartlarının rectangle grid kafes yapı üzerinde gösterimi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulguların değerlendirilmesi üç bölümde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sayısal modellerin doğrulanması için yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir. İkinci kısımda, kafes yapıların Poisson oranlarının belirlendiği analizler ile birlikte kompozit yapıların eksenel basınç etkisi altındaki davranışlarının incelendiği analiz sonuçları paylaşılmıştır. Son kısımda ise incelenen kompozitler arasında en iyi mekanik davranışın elde edildiği birer BDÖ ve BDG kompozit yapıları dikkate alınarak, birim hücrelerin kalınlıkları ve boyutları üzerinden yapılan parametrik çalışmanın sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

4.1. Sayısal Modellerin Doğrulama Çalışması Sonuçları

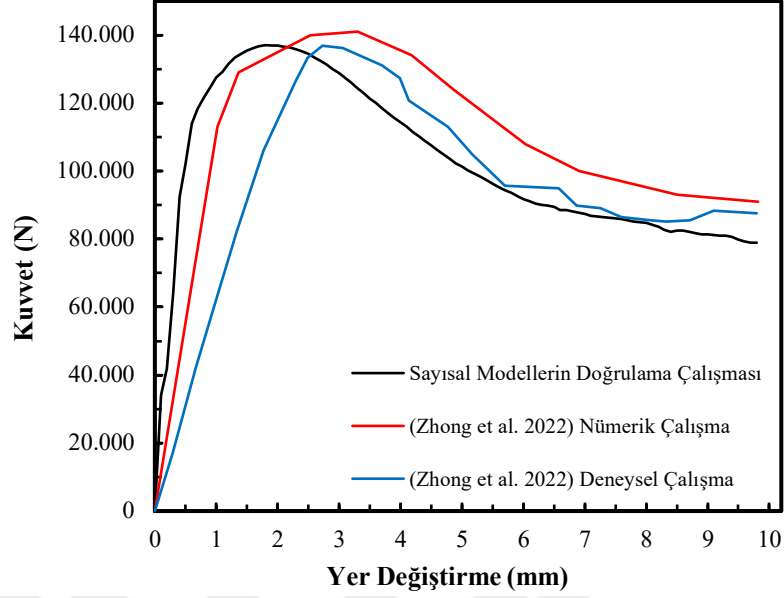
Sayısal modellerin doğruluğunun ortaya konması amacıyla Bölüm 3.1.1’de modellenen yapının nümerik analizleri gerçekleştirilmiş ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre tasarlanan model ile referans makaledeki deneysel çalışma arasında bir karşılaştırma yapıldığında, yapıların dayanımları arasındaki farkın %1’den az olduğu, enerji yutma kapasitelerinin arasındaki farkın ise %10’dan az olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında, oluşturulan sonlu eleman modellerinde kullanılan sınır şartlarının ve eleman tipi boyutunu uygun olduğu ortaya konmuştur.

Çizelge 4.1. Sayısal modellerin doğrulama çalışmasının ve Zhong et al. (2022) tarafından yapılan çalışmanın karşılaştırılması.

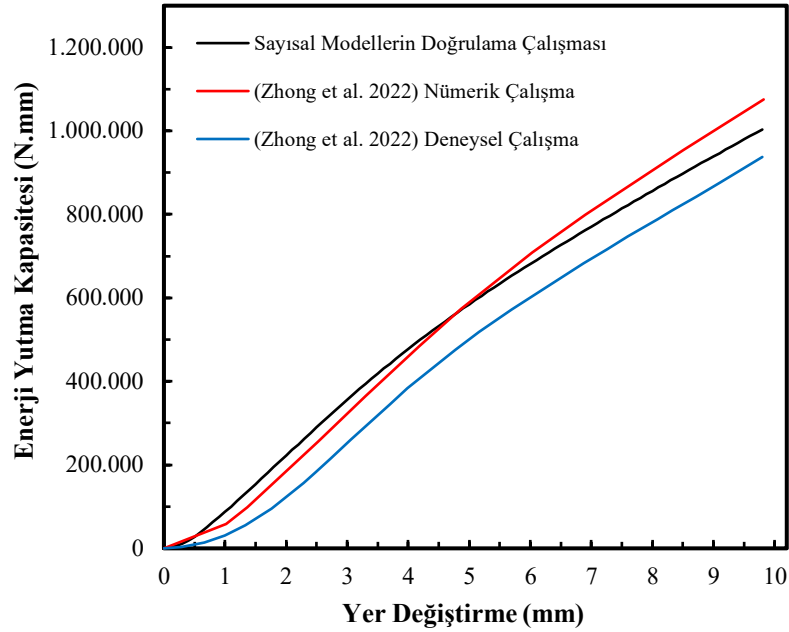
Kompozit Yapılar	Dayanımı (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (N.m)	Dayanım Yüzdellik Fark (%)	Enerji Yutma Kapasitesi Yüzdellik Fark (%)
Sayısal Modellerin Doğrulama Çalışması	137	1.003,2	0,73	7,01
Deneysel Çalışma (Zhong et al. 2022)	136	937,5	-	-
Deneysel Nümerik (Zhong et al. 2022)	141	1.075,3	-	-

Sayısal modellerin doğrulaması amacıyla yapılan analizden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrilerinin, Zhong et al. (2022)

tarafından yapılan deneysel ve nümerik çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılması, sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Beton dolgulu yatay elemanları çift kat olan re-entrant yapının kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.

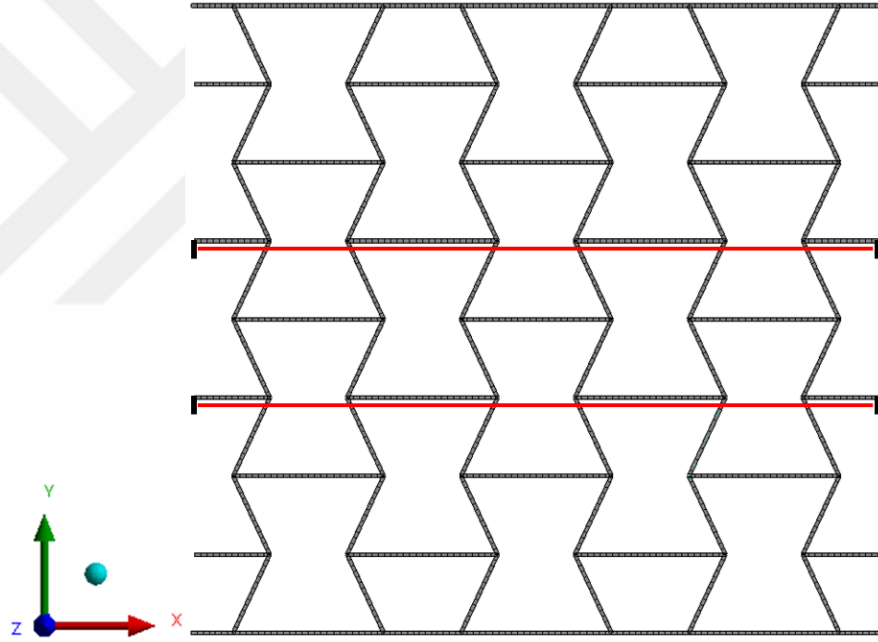


Şekil 4.2. Beton dolgulu yatay elemanları çift kat olan re-entrant yapının enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırması.

4.2. Dolgulu Kafes Yapıların Analizlerinin İncelenmesi

Bu başlık altında ilk olarak kompozitlerde kullanılan kafes yapıların Poisson oranları ve direngenlikleri verilmiştir. İkinci olarak da bu kompozit yapıların basınç altındaki kuvvet-yer değiştirme eğrileri, enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri ve yapılarda oluşan von Mises gerilmelerinin incelenmesi sunulmuştur.

Kafes yapıların sayısal analizleri gerçekleştirildikten sonra, bu yapıların Poisson oranları, Şekil 4.3'te re-entrant kafes yapısı üzerinde gösterilen kırmızı çizgilerin boylarındaki değişim miktarının ortalamasının (ε_e) yapıya uygulanan -0.1 mm deplasmana (ε_b) bölünmesiyle hesaplanmıştır (Eşitlik 4.1).



Şekil 4.3. Kafes yapıların Poisson oranlarının hesaplanmasında kullanılan doğru parçalarının re-entrant kafes yapısı üzerinde gösterimi.

$$\nu = \frac{-\varepsilon_e}{\varepsilon_b} \quad (4.1)$$

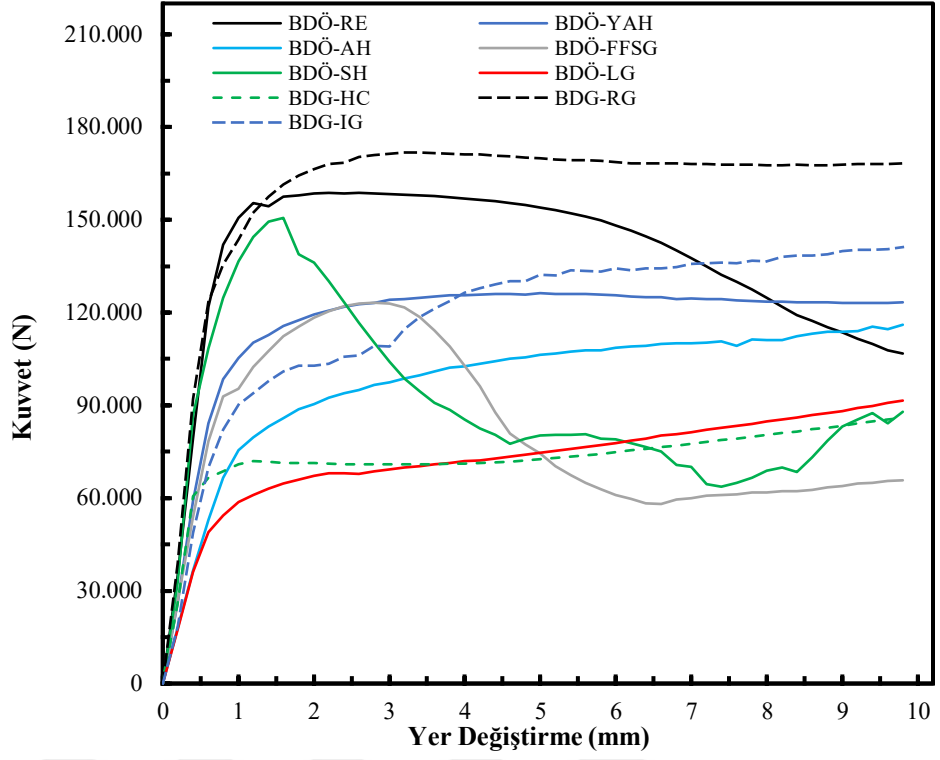
Kafes yapıların direngenlikleri ise kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin eğimi alınarak hesaplanmıştır. Kafes yapıların birim hücre kalınlıkları, Poisson oranları ve direngenlikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kafes yapıların birim hücre kalınlıkları, Poisson oranları ve direngenlikleri

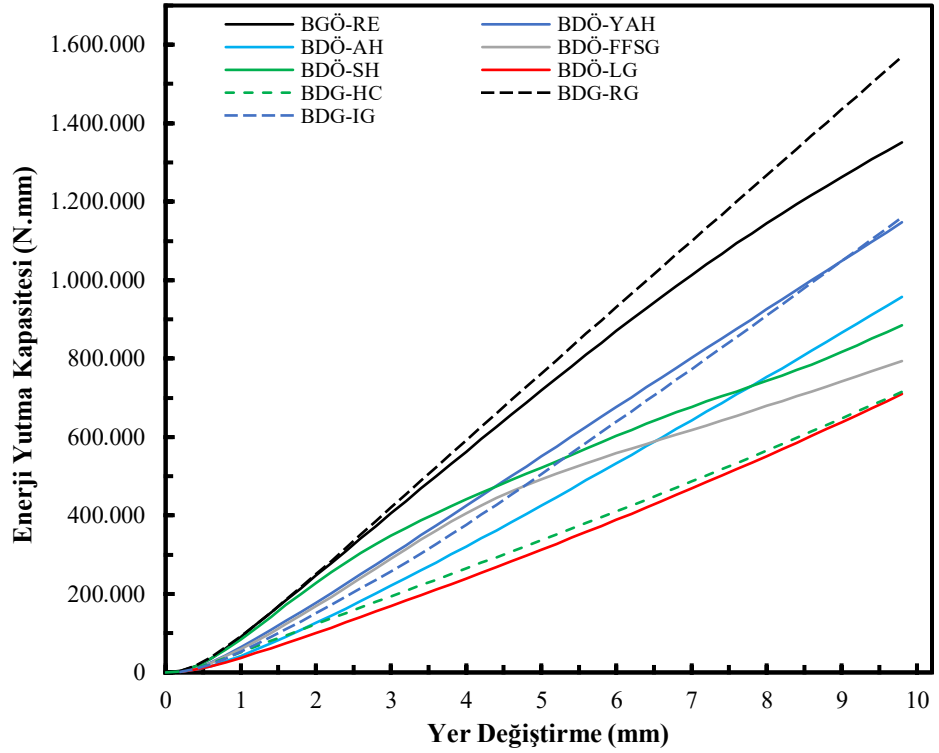
Kafes Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)
Re-Entrant	0,6	-2,08	1.597,7
Arrowhead	0,45	-1,78	464,4
Yeni Arrowhead	0,5	-1,50	511,6
Lozenge Grid	0,65	-0,58	411,6
Formed From Square Grid	0,45	-1,20	114,3
Star Honeycomb	0,45	-0,24	321,7
Honeycomb	0,7	2,02	2.687
Rectangle Grid	0,6	~ 0,00	129.980
Isogrid	0,55	0,42	102.220

Bu kafes yapılar incelendiğinde, en düşük Poisson oranına sahip kafes yapının re-entrant olduğu görülürken, en yüksek Poisson oranı sahip kafes yapının honeycomb olduğu belirlenmiştir. Kafes yapıların direngenlikleri karşılaştırıldığında en yüksek direngenlik rectangle grid kafes yapısında görülürken, en düşük direngenliğin formed from square grid kafes yapısında olduğu belirlenmiştir. Bu kafes yapıların şekil değişimlerinin daha iyi görülebilmesi için otuz kat büyütülmüş, büyük ölçekli görüntüleri çalışmanın Ek-1 kısmında toplu olarak verilmiştir.

Kafes yapıların beton ile doldurulmasıyla elde edilmiş olan bu kompozit yapıların sayısal modellerinin analizlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri, sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Ayrıca, bu kompozit yapıların kafeslerinin birim hücre kalınlıkları, dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Kompozit yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri



Şekil 4.5. Kompozit yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri

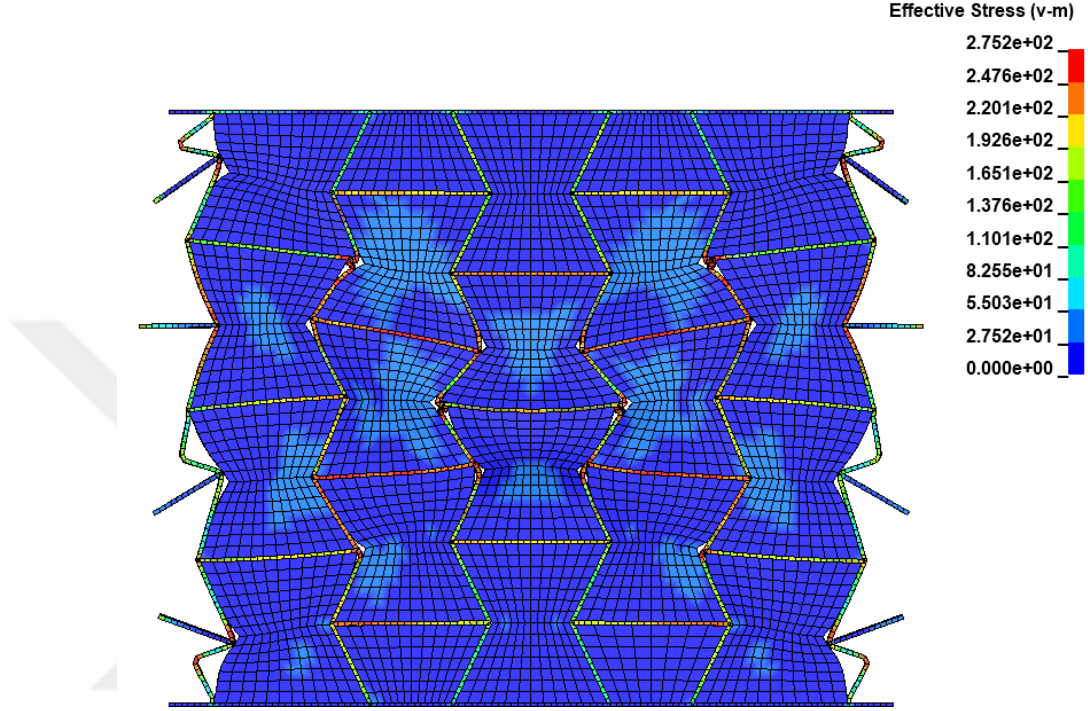
Çizelge 4.3. Kompozit yapıların, kafeslerinin birim hücre kalınlıkları, dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.

Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Dayanımı (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (N.m)
BDÖ-RE	0,6	158,7	1.351,0
BDÖ-AH	0,45	116,1	957,3
BDÖ-YAH	0,5	126,3	1.147,5
BDÖ-LG	0,65	150,6	710,0
BDÖ-FFSG	0,45	123,2	939,7
BDÖ-SH	0,45	91,5	884,9
BDG-HC	0,7	85,9	715,4
BDG-IG	0,6	171,8	1.569,6
BDG-RG	0,55	141,2	1.160,3

Çizelge 4.3'te verilen kompozit yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında, en yüksek dayanıma ve enerji yutma kapasitesine sahip kompozit yapının BDG-RG olduğu görülürken en düşük dayanımın BDG-HC kompozitine, en düşük enerji yutma kapasitesinin ise BDÖ-LG kompozitine ait olduğu saptanmıştır. Kompozit yapıların içerisinde kullanılan kafes yapının türüne göre, yani BDÖ ve BDG kompozit yapılar olarak kendi aralarında bir karşılaştırma yapıldığında, BDÖ kompozit yapılarda en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesinin BDÖ-RE kompozitine ait olduğu görülürken en düşük dayanım ve enerji yutma kapasitesinin BDÖ-LG ait olduğu belirlenmiştir. BDG kompozit yapılar karşılaştırıldığında ise tüm kompozit yapıların karşılaştırılmasında olduğu gibi, en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesinin BDG-RG kompozitine ait olduğu görülürken en düşük dayanım ve enerji yutma kapasitesinin ise BDG-HC kompozitine ait olduğu saptanmıştır.

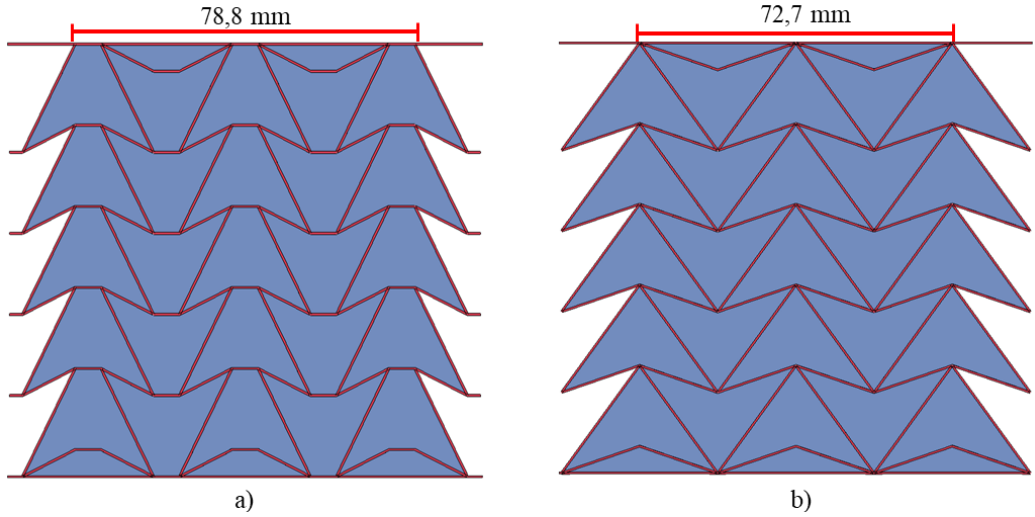
Re-entrant kafes yapısının, diğer öksetik kafesler ile karşılaştırıldığında en iyi öksetikliğe ve en yüksek direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu kafes yapının direngenliğinin yüksek olmasının, BDÖ-RE kompozit yapının dayanımının artmasına katkıda bulunduğu söylenebilir. Ayrıca, bu kafes yapının öksetikliğinin daha iyi olması, kafes yapı içerisinde bulunan betonun yanıl genişlemesini daha fazla kısıtlamaktadır. BDÖ-RE yapısının diğer BDÖ kompozit yapılarından daha yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olması bu iki davranış karakteriyle açıklanabilir. Şekil 4.6'da verilen BDÖ-RE kompozit yapısının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü incelendiğinde, yapının orta bölgesinde bulunan hem

beton kısımlarda hem de kafes yapının parçalarında von Mises gerilmelerinin daha fazla olduğu ve yapıda beton ile kafesin ayrıştığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.4'te kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde ise kompozit yapıda göçme olduğu ve yapının tepki kuvvetinin düştüğü tespit edilmiştir.



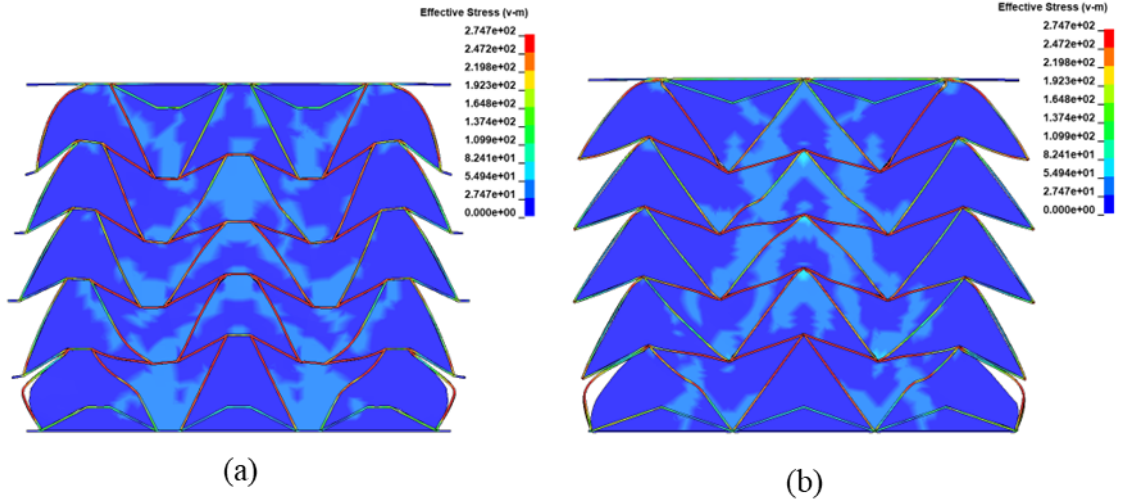
Şekil 4.6. BDÖ-RE kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

Arrowhead ve yeni arrowhead kafesleri, diğer öksetik kafes yapılar ile öksetiklikleri bakımından karşılaştırıldığında, sırasıyla en iyi ikinci ve üçüncü öksetikliğe sahip kafesler olduğu görülmektedir. Bu kafes yapılar direngenlikleri bakımından karşılaştırıldığında ise sırasıyla en yüksek üçüncü ve ikinci direngenliğe sahip öksetik yapılardır.



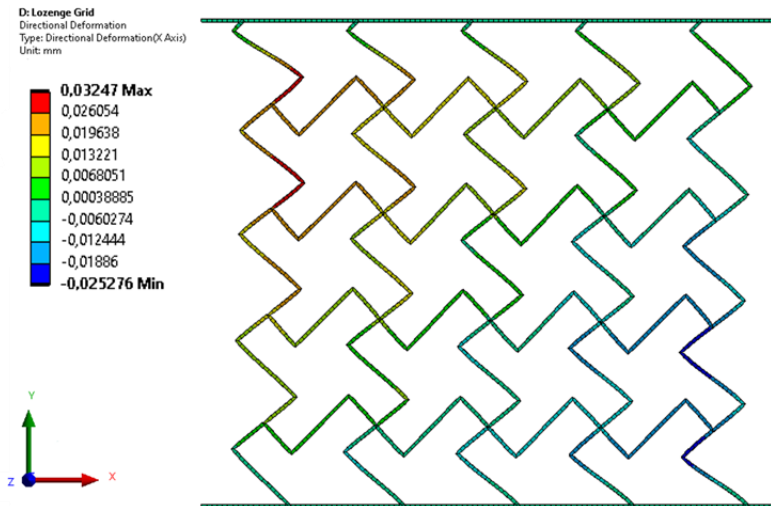
Şekil 4.7. a) BDÖ-YAH ve b) BDÖ-AH kompozit yapıların kesitlerinin en kısa ölçüleri

BDÖ-YAH ve BDÖ-AH kompozit yapılarındaki kafeslerin öksetiklik ve direngelik değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir fakat BDÖ-YAH yapının dayanımı ve enerji yutma kapasitesi BDÖ-AH yapısından önemli ölçüde daha büyüktür. Bu durum, Şekil 4.7’de gösterilen BDÖ-YAH yapısının en kısa kesit uzunluğunun, BDÖ-AH yapısının en kısa kesit uzunluğundan daha büyük olmasıyla açıklanabilir. Bu kompozit yapıların Şekil 4.8’de verilen 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüleri incelendiğinde, iki yapıda da aynı bölgelerde von Mises gerilmelerinin daha fazla olduğu ve yapıların şekil değiştirmelerine bakıldığında beton ile kafesin birbirlerinden ayrılmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.4’te yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde ise bu yapılarda göçme oluşmadığı ve yapıların tepki kuvvetlerinin dayanımlarına yakın düzeyde azalmadan devam ettiği görülmektedir.



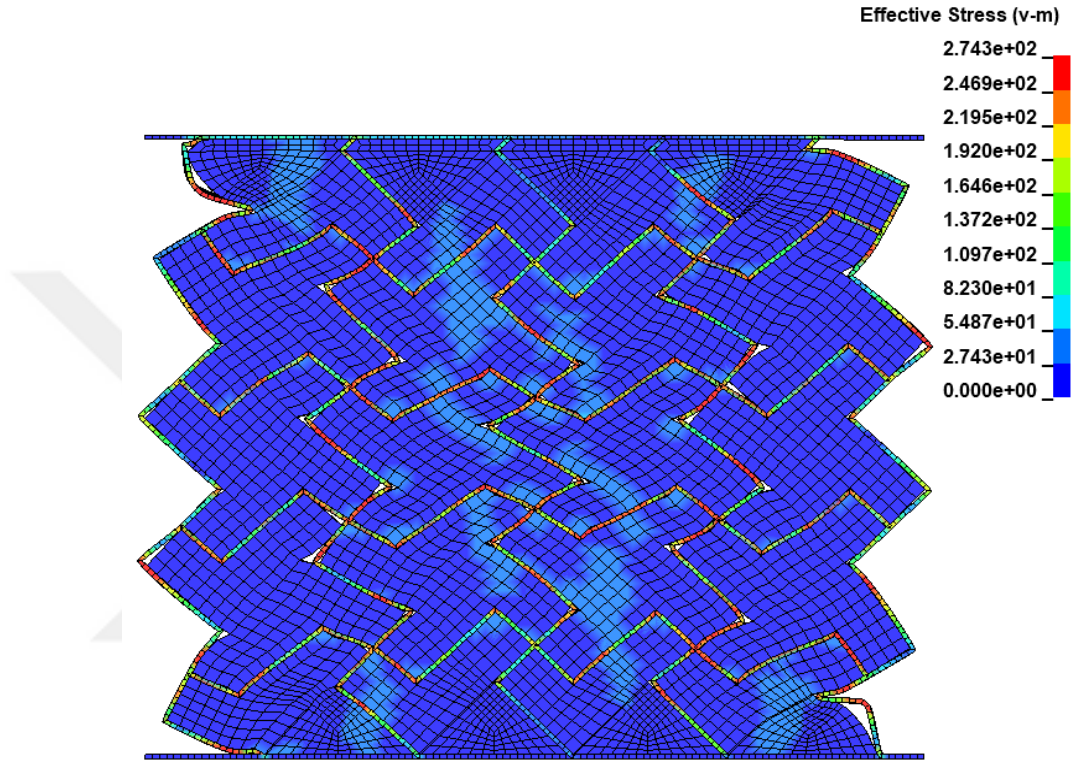
Şekil 4.8. (a) BDÖ-YAH ve (b) BDÖ-AH yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

Lozenge grid kafes yapısının, diğer öksetik kafesler ile karşılaştırıldığında en iyi beşinci öksetikliğe ve en yüksek dördüncü direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. BDÖ-LG kompozit yapısı BDÖ kompozitler ile karşılaştırıldığında, takviye elemanı olan lozenge grid kafesinin en düşük öksetikliğe ve direngenliğe sahip olmamasına rağmen, BDÖ-LG kompozit yapısının en düşük dayanıma ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 4.9’da gösterilen lozenge grid kafes yapısının basınç altında simetrik olmayan şekil değiştirmesiyle ve kompozit yapıdaki beton dolguların geometrilerinin elverişsiz yük aktarımı sağlamasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.9. Lozenge grid kafes yapısının basınç altında, x yönündeki yer değiştirme değerleri.

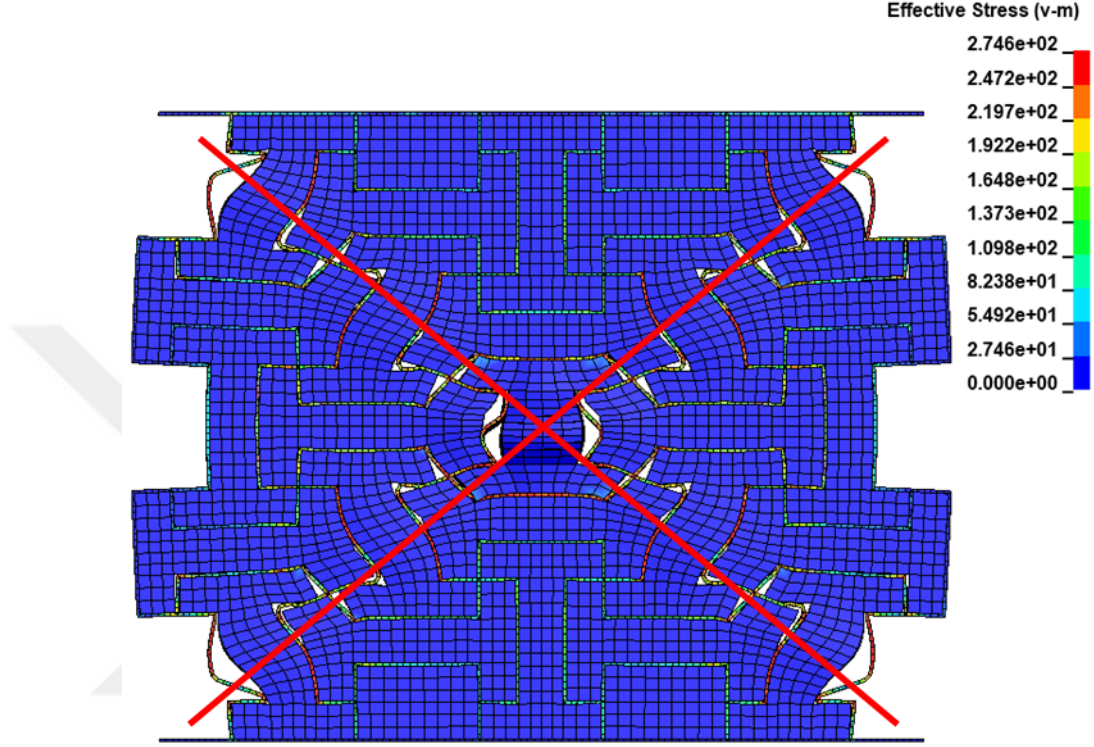
Şekil 4.10’da verilen BDÖ-LG kompozit yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü incelendiğinde, yapının orta kısımlarındaki dolgu betonların von Mises gerilmelerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.4’te kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde ise yapıda göçme olmadan yapının tepki kuvvetinin sürekli arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. BDÖ-LG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

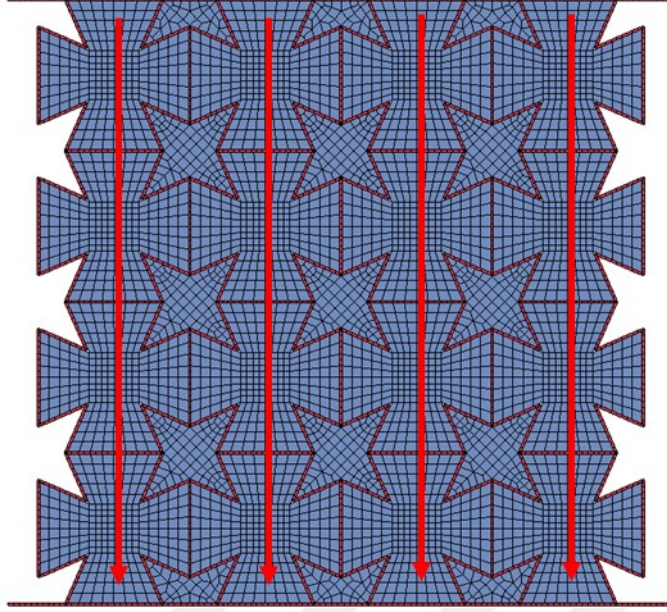
Formed from square grid kafes yapısının, diğer öksetik kafesler ile karşılaştırıldığında en iyi dördüncü öksetikliğe ve en düşük direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de verilen BDÖ-FFSG kompozit yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki deformasyonu incelendiğinde, bu şekil üzerinde kırmızı doğru parçalarının kesişiminde bulunan beton parçasının büyük oranda şekil değişimine uğradığı ve bu kompozitte, beton ile kafes yapının birbirinden ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca, bu şekildeki von Mises gerilmeleri incelendiğinde, kırmızı renkle gösterilen doğruların çevresindeki kafes yapının elemanlarında, von Mises gerilmelerinin en yüksek düzeyde olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi basınç altındaki bu kompozit yapının “X” şeklinde deforme olduğu ve bu durumda, yapıda kesmeye bağlı göçme oluştuğu belirlenmiştir. BDÖ-FFSG yapısının Şekil 4.4’te kuvvet-yer

değiştirme eğrisi incelendiğinde ise basınç altında önce yapının dayanım seviyesi olan tepki kuvvetine ulaştığı daha sonra yapıya uygulanan yer değiştirme arttıkça tepki kuvvetinin düştüğü ve uygulanan yer değiştirme 6 mm'ye gelince yapının tepki kuvvetinin plato bölgesine girerek düz devam ettiği görülmektedir.



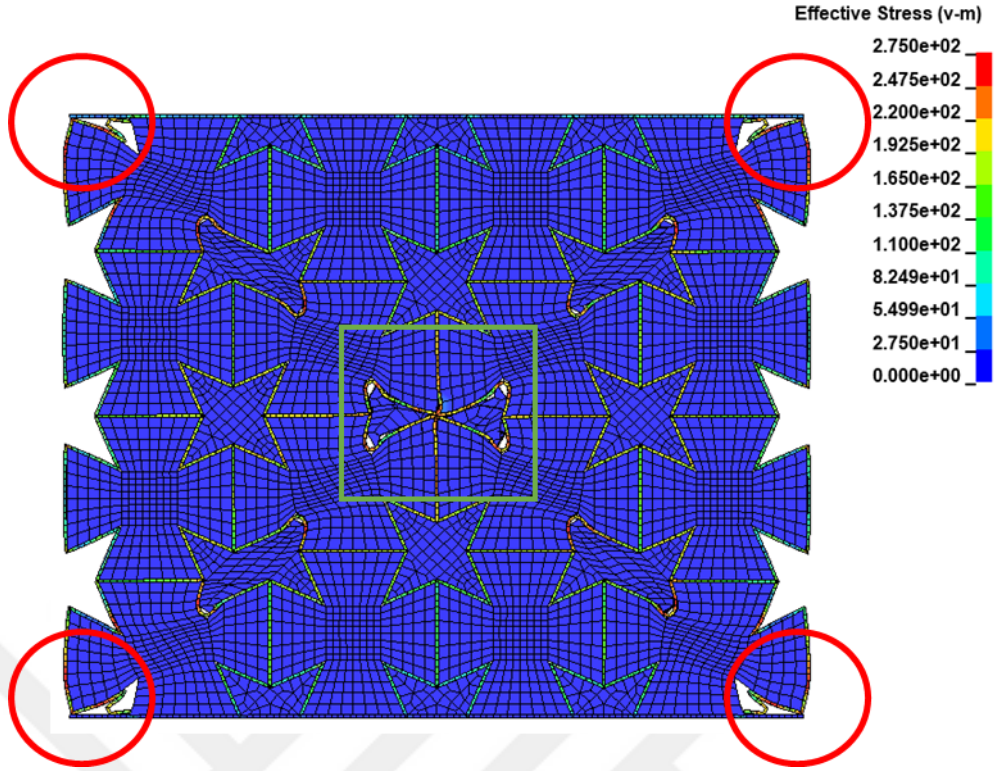
Şekil 4.11. BDÖ-FFSG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kesmeye bağlı oluşan “X” şeklindeki göçmenin görüntüsü.

Star honeycomb kafes yapısının, diğer öksetik kafesler ile karşılaştırıldığında, en düşük öksetikliğe ve en yüksek beşinci direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Star honeycomb kafes yapısı, en düşük öksetikliğe ve diğer kafes yapılara göre oldukça düşük direngenliğe sahip olmasına rağmen, BDÖ-SH yapısının ortalama bir dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum kompozit yapıda, yıldız şeklinde olmayan dolgu beton yapılarının alt ve üst yüzeylerinin, uygulanan yer değiştirmeye dik konumda olmasından dolayı basınç altındaki ana yükü taşımasıyla açıklanabilir. Bu yük aktarımı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



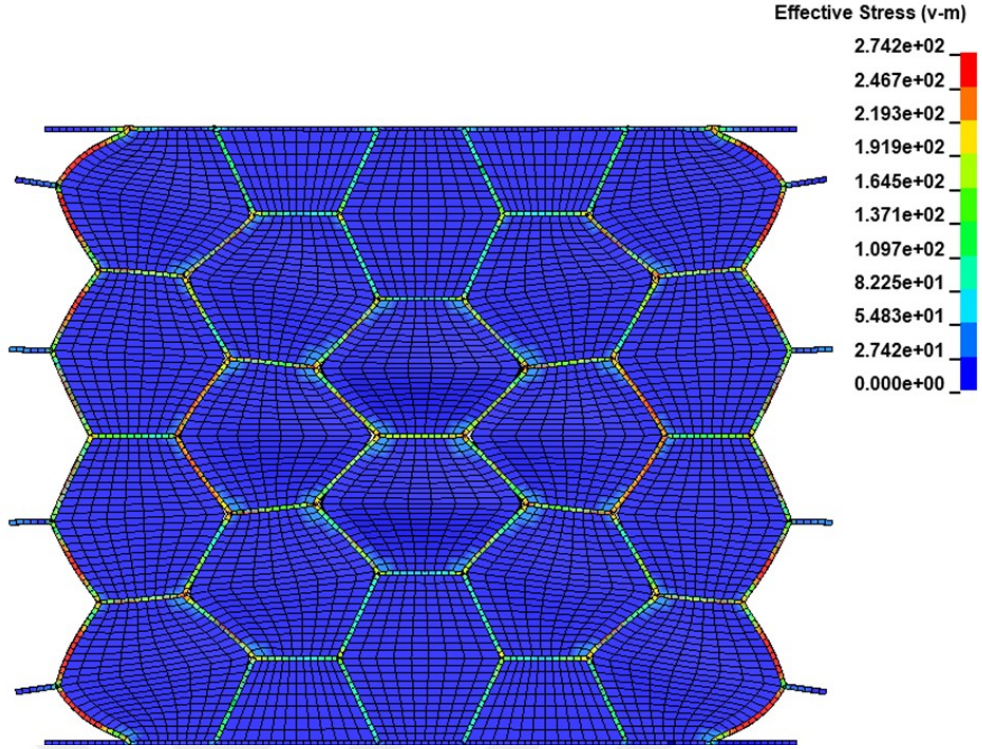
Şekil 4.12. BDÖ-SH kompozitinin ana yük taşıma yönlerinin gösterimi

Şekil 4.13'te verilen, BDÖ-SH kompozit yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü incelendiğinde, yeşil kare içerisinde gösterilen orta bölgedeki yıldız şekilli betonun büyük ölçüde deforme olup parçalandığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.4'te verilen BDÖ-SH'nın kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve yapının deforme şekli birlikte incelendiğinde ise ilk olarak yapının dayanım seviyesi olan en yüksek tepki kuvvetine ulaştığı daha sonra Şekil 4.13'te yeşil kare içerisinde gösterilen yıldız şekilli betonun parçalanmasıyla birlikte tepki kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Uygulanan yer değiştirme 7,5 mm'ye ulaştığında ise Şekil 4.13'te kırmızı çemberler ile gösterilen köşelerin alt ve üst plakalara değmesinden itibaren tepki kuvvetinin tekrardan arttığı belirlenmiştir.



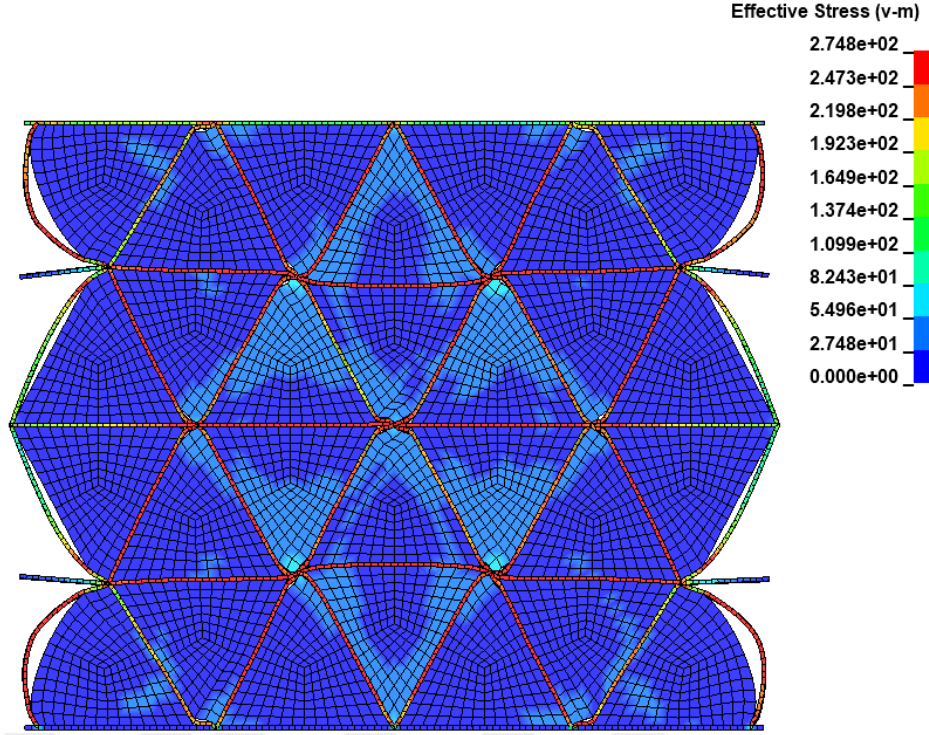
Şekil 4.13. BDÖ-SH kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

Honeycomb kafes yapısının, diğer geleneksel kafesler ile karşılaştırıldığında en yüksek Poisson oranına ve en düşük direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.14'te verilen BDG-HC kompozit yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von-Mises gerilmeleri incelendiğinde, en yüksek gerilmelerin bu kompozit yapının hem sağ hem de sol tarafında dışta bulunan kafes elemanlarında olduğu ve beton ile kafes yapının ayrılmadığı gözlenmiştir. Basınç altında, honeycomb kafes ve dolgu betonlar pozitif Poisson oranı özelliklerinden dolayı genişlemektedirler. Honeycomb kafes ile birlikte genişleyen beton yapının basınç altında en düşük düzeyde tepki kuvveti göstermesi, bu davranış karakteri ile açıklanabilir. Benzer bir durum, Li et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada görülmüştür. Köpük dolgulu kafesler üzerine yapılan bu parametrik çalışmada, pozitif Poisson oranına sahip kafeslerin Poisson oranları artırıldığında, yapıların dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.4'te kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde ise yapıda göçme olmadan yapının tepki kuvvetinin sürekli arttığı tespit edilmiştir.



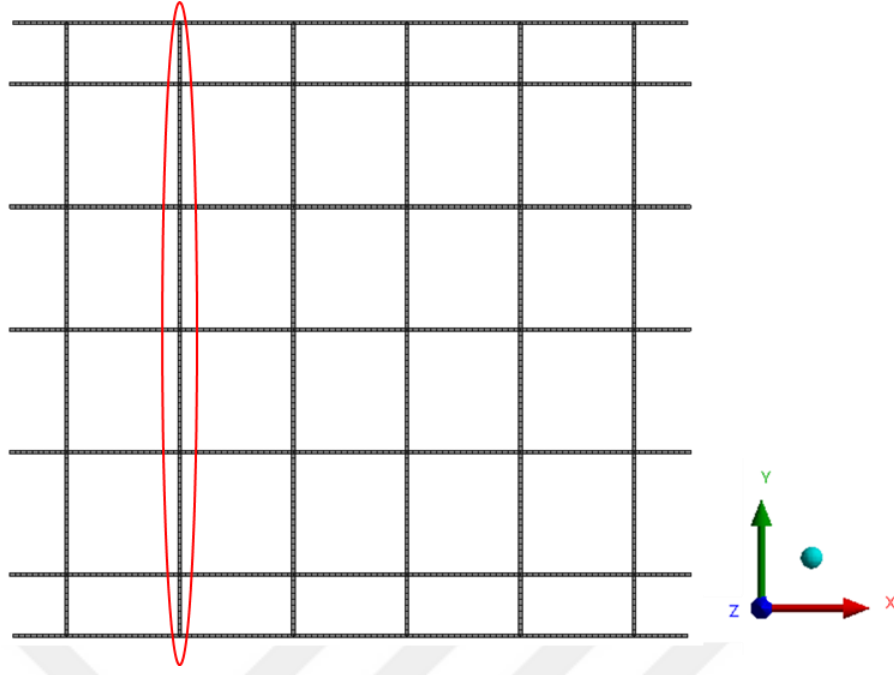
Şekil 4.14. BDG-HC kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

Isogrid kafes yapısının, diğer geleneksel kafesler ile karşılaştırıldığında en yüksek ikinci Poisson oranına ve direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Diğer kafes yapılarla, rectangle grid ve isogrid kafeslerin direngenlikleri karşılaştırıldığında, rectangle grid ve isogrid kafeslerinin bu özelliklerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum üçgenlerden oluşan isogrid kafes yapısının, diğer kafesler ile karşılaştırıldığında en kararlı yapıya sahip kafes olmasıyla açıklanabilir. Şekil 4.15'te verilen BDG-IG yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilmeleri ve deformasyonları incelendiğinde, üçgen şekilli dolgu betonların, yapıya uygulanan yer değiştirmeye paralel olan uçlarında von Mises gerilmelerinin daha yüksek olduğu ve bu kompozit yapının kafes elemanların birleşim bölgelerine yakın yerlerde burkulma meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, yapının sayısal analiz sonuçları ve Şekil 4.4 birlikte incelendiğinde, kafes yapıların elemanlarında burkulma oluşumunun, yapıya uygulanan yer değiştirme 1,2 mm'ye ulaşınca başladığı ve uygulanan yer değiştirme 3 mm'ye gelince kompozit yapının daha kararlı bir hale gelip tepki kuvvetinin arttığı saptanmıştır. BDG-IG yapısının Şekil 4.4'te kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde ise, yapıda göçme olmadan tepki kuvvetinin sürekli arttığı tespit edilmiştir.



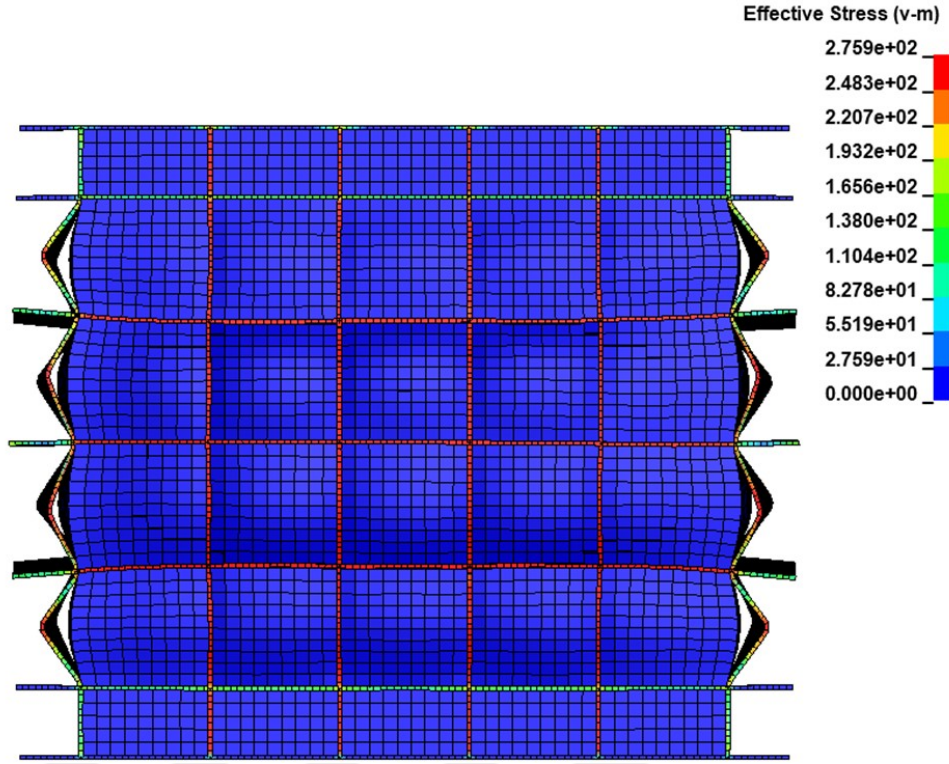
Şekil 4.15. BDG-IG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

Rectangle grid kafes yapısının, diğer geleneksel kafesler ile karşılaştırıldığında yaklaşık sıfır Poisson oranına ve en yüksek direngenliğe sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Wang and McDowell (2004)'ün farklı kafes yapılar üzerine yaptığı teorik çalışmada da rectangle grid kafes yapısının Poisson oranının yaklaşık sıfır değerinde olduğu belirlenmiştir. Rectangle grid kafes yapısının, kırmızı elips içerisinde Şekil 4.16'da gösterilen altı elemanı bulunmaktadır. Kafes yapının bu elemanları, yer değiştirmeye dik bir konumda olmaları sayesinde doğrudan kuvveti alt plakaya aktarmaktadır. Ayrıca, kafes yapıya uygulanan yer değiştirme küçük olduğundan kafes yapının dikey elemanlarında burkulma oluşmamaktadır. Bu iki durum, bu kafes yapının en yüksek direngenliğe sahip olmasının nedenleri olarak belirtilebilir.



Şekil 4.16. Rectangle grid kafesin gösterimi

BDG-RG yapısının en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olması, hem kompozit yapıdaki kafesin yüksek direngenliğinden hem de BDÖ-SH yapısındaki yük aktarımının bir benzerinin BDG-RG yapısının tüm beton elemanlarında görülmesiyle açıklanabilir. Şekil 4.17’de verilen BDG-RG kompozit yapının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilmeleri ve deformasyonları incelendiğinde, kafes yapının en dışta kalan uzun elemanlarının burkulduğu ve iç tarafta kalan elemanlarda ise beton dolguların desteklemesiyle burkulmanın engellendiği görülmektedir. Bu burkulmanın olmadığı bazı kafes elemanlarında en yüksek düzeyde von-Mises gerilmelerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, BDG-IG yapısı, 275,9 MPa ile en yüksek von-Mises gerilmesinin oluştuğu yapı konumundadır. Basınç altındaki bu BDG-RG yapının sayısal simülasyonları ve Şekil 4.4’teki kuvvet yer-değiştirme eğrisi birlikte incelendiğinde, kafes yapının en dışta kalan elemanlarında burkulma oluşumunun, yapıya uygulanan yer değiştirme 0,6 mm’ye ulaşınca başladığı ve uygulanan yer değiştirme 3 mm’ye gelince tüm dışta kalan uzun kafes elemanlarında burkulmanın gerçekleştiği saptanmıştır. Yer değiştirme 3 mm’den 10 mm’ye gelinceye kadar yapıda göçme olmadan tepki kuvvetinin hafif azalarak doğrusal bir şekilde devam ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. BDG-RG kompozitinin 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü.

4.3. BDÖ ve BDG Kompozit Yapıları Üzerinde Parametrik Çalışma

Dolgulu kafes yapıların sonlu elemanlar yöntemi analizlerinin gerçekleştirilmesinden sonra, bu yapılardan en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olan bir BDÖ ile bir BDG kompozit yapının seçilmesi planlanmıştır. Bölüm 4.2'deki incelemelerin sonucunda, BDÖ kompozit olarak BDÖ-RE, BDG kompozit olarak ise BDG-RG yapısı seçilmiştir ve bu yapılar üzerinde iki parametrik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan ilki yapıların kafeslerin birim hücre kalınlıklarının değiştirilmesiyle, ikinci ise bu yapıların kafeslerinin birim hücre boyutlarının değiştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Birim hücre kalınlıkları

Yapıların farklı birim hücre kalınlıklarının yapı özelliklerine olan etkisinin incelenmesi için Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de verilen BDÖ-RE ve BDG-RG kompozit yapılarının birim hücre kalınlıkları 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm 1,2 mm ve 1,4 mm olacak şekilde tekrardan tasarlanmıştır. Bu yapıların geometrik özellikleri Çizelge 4.4’te, bu kompozitlerdeki kafes yapıların Poisson oranları ve direngenlikleri ise Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip beton dolgulu kafes yapıların geometrik özellikleri.

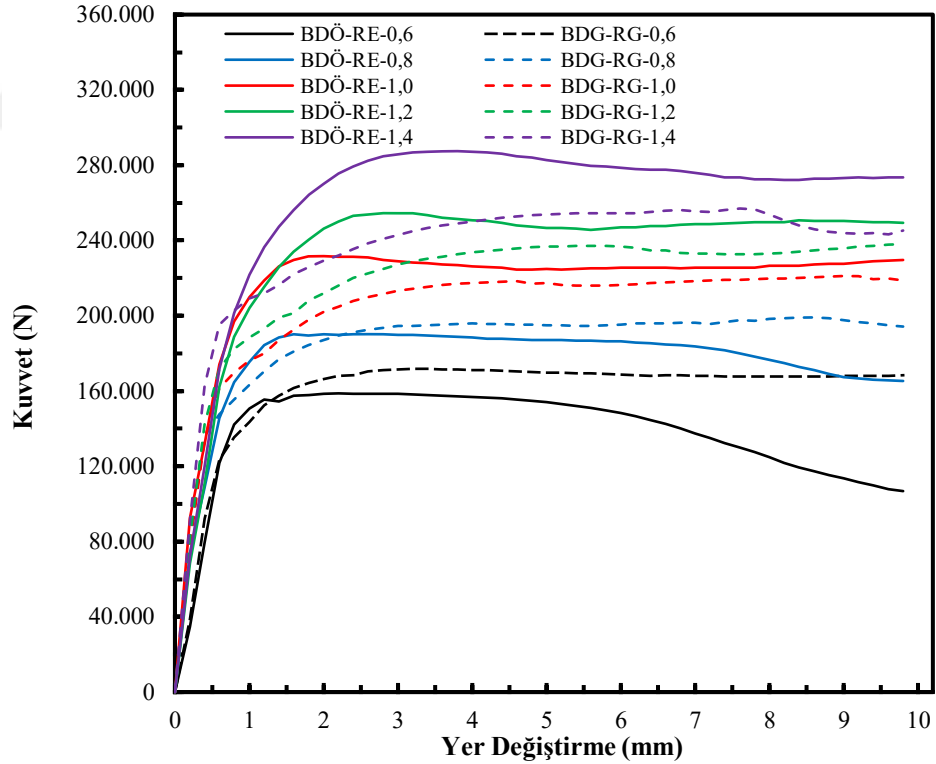
Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Kafes Hacim (mm ³)	Beton Hacim (mm ³)	Kafes Rölatif Yoğunluk (%)	Beton Rölatif Yoğunluk (%)
BDÖ-RE-0,6	0,6	41.581	423.100	7,56	76,93
BDÖ-RE-0,8	0,8	55.441	412.935	10,08	75,08
BDÖ-RE-1,0	1	69.301	402.884	12,60	73,25
BDÖ-RE-1,2	1,2	83.162	392.946	15,12	71,44
BDÖ-RE-1,4	1,4	97.022	383.122	17,64	69,66
BDG-RG-0,6	0,6	41.250	431.390	7,50	78,43
BDG-RG-0,8	0,8	55.000	421.260	10,00	76,59
BDG-RG-1,0	1	68.750	411.250	12,50	74,77
BDG-RG-1,2	1,2	82.500	401.360	15,00	72,97
BDG-RG-1,4	1,4	96.250	391.590	17,50	71,20

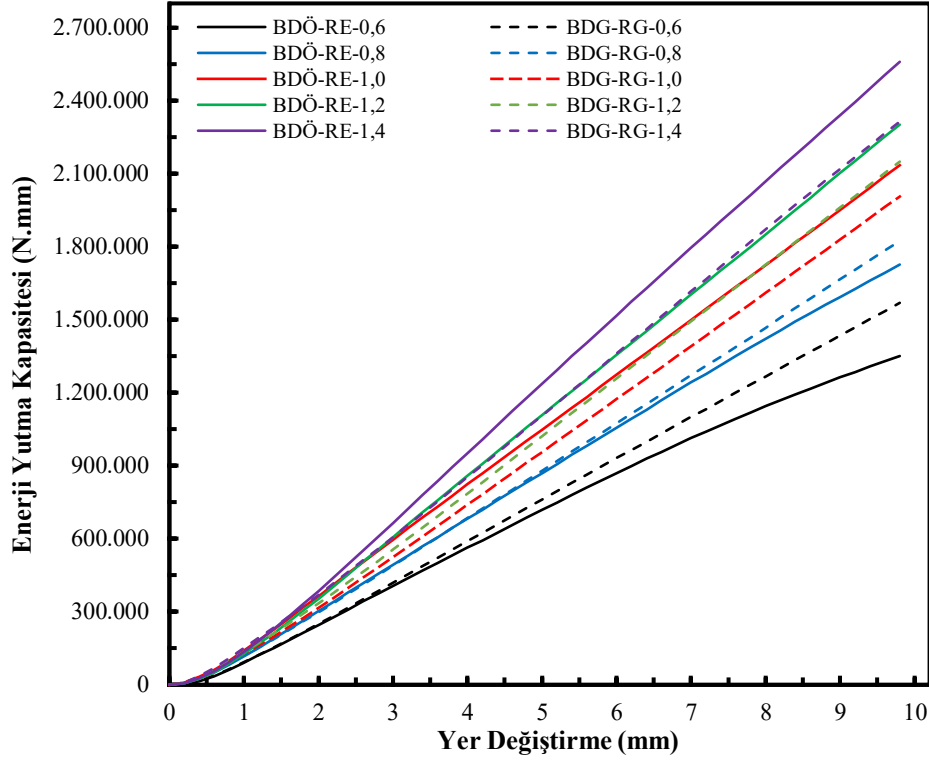
Çizelge 4.5 incelendiğinde, Xue et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi, re-entrant kafes yapısının birim hücre kalınlığı arttıkça yapının öketikliğinin giderek azaldığı görülmektedir. Rectangle grid kafes yapısında ise birim hücre kalınlığı değişse bile Poisson oranının sabit kaldığı saptanmıştır. Rectangle grid kafes yapısının kalınlığı artmasına rağmen Poisson oranının değişmemesi durumu, rectangle grid kafes yapısının elastik bölgede şekil değiştirme açısından oldukça kararlı bir yapıya sahip olmasıyla açıklanabilir. Bu kafes yapıların şekil değişimlerinin daha iyi görülebilmesi için otuz kat büyütülmüş, büyük ölçekli görüntüleri çalışmanın Ek-2 kısmında toplu olarak verilmiştir. Ayrıca birim hücre kalınlıklarına göre kafes yapıların direngenlikleri incelendiğinde, re-entrant kafes yapısının birim hücre kalınlığı arttıkça direngenliğinin üstel şekilde arttığı görülürken, rectangle grid kafes yapısının birim hücre kalınlığı arttıkça direngenliğinin de doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip kafes yapıların Poisson oranları ve direngenlikleri.

Kafes Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)
Re-Entrant	0,6	-2,08	1.597,7
Re-Entrant	0,8	-2,05	3.726,2
Re-Entrant	1	-2,02	7.130,3
Re-Entrant	1,2	-1,99	12.040
Re-Entrant	1,4	-1,95	18.610
Rectangle Grid	0,6	~ 0,00	129.980
Rectangle Grid	0,8	~ 0,00	173.300
Rectangle Grid	1	~ 0,00	216.630
Rectangle Grid	1,2	~ 0,00	259.960
Rectangle Grid	1,4	~ 0,00	303.290

Farklı birim hücre kalınlığına sahip BDÖ-RE ve BDG-RG yapılarının sayısal analizlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri, sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir.

**Şekil 4.18.** Beton dolgulu, farklı birim hücre kalınlığına sahip kafes yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.



Şekil 4.19. Beton dolgulu, farklı birim hücre kalınlığına sahip kafes yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri.

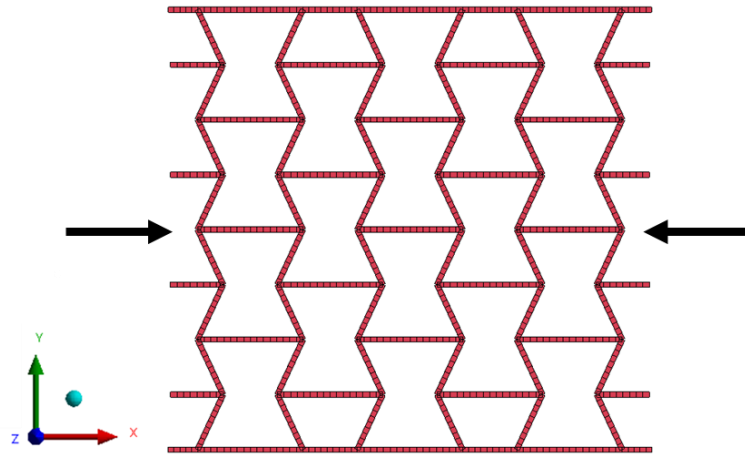
Beton dolgulu farklı birim hücre kalınlığına sahip kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Ayrıca, bu kompozit yapıların 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüleri Ek-3 kısmında toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı birim hücre kalınlıklarına sahip beton dolgulu kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.

Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Dayanımı (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (N.m)
BDÖ-RE-0,6	0,6	158,7	1.351,0
BDÖ-RE-0,8	0,8	190,2	1.784,3
BDÖ-RE-1,0	1	231,5	2.135,0
BDÖ-RE-1,2	1,2	254,5	2.301,9
BDÖ-RE-1,4	1,4	287,3	2.560,0
BDG-RG-0,6	0,6	171,8	1.569,6
BDG-RG-0,8	0,8	199,1	1.823,2
BDG-RG-1,0	1	221,0	2.006,3
BDG-RG-1,2	1,2	238,0	2.149,9
BDG-RG-1,4	1,4	256,9	2.314,3

Çizelge 4.6 incelendiğinde, BDÖ-RE-1,4 yapısının 287,3 kN ile en yüksek dayanıma sahip olduğu görülürken, en düşük dayanımın ise 158,7 kN ile BDÖ-RE-0,6 yapısına ait olduğu saptanmıştır. Bu yapıların enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında ise dayanımlarının karşılaştırmasında olduğu gibi, en yüksek enerji yutma kapasitesinin BDÖ-RE-1,4 yapısına ait olduğu, en düşük enerji yutma kapasitesinin ise BDÖ-RE-0,6 yapısına ait olduğu görülmüştür. Sadece kafesleri rectangle grid olan kompozitler incelendiğinde ise, BDG-RG-1,4 yapısı 256,9 kN ile en yüksek dayanıma sahipken, en düşük dayanımın 171,8 kN ile BDG-RG-0,6 yapısına ait olduğu belirlenmiştir.

BDÖ-RE ve BDG-RG kompozit yapılarındaki kafeslerin birim hücre kalınlığı arttıkça, bu kompozit yapıların da dayanımlarının arttığı görülmektedir. Bu artış her iki kompozit yapıda da yaklaşık olarak doğrusal gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, BDÖ-RE yapısında kafesin kalınlığının her 0,2 mm'lik artışında, dayanımdaki ortalama artışın 32,1 kN olduğu görülürken, BDG-RG yapısında ise ortalama artışın 21,3 kN olduğu belirlenmiştir. Basınç altında re-entrant kafes, Şekil 4.20'de gösterildiği gibi siyah oklar yönünde daralmaktadır ve içinde bulunan malzemeye de bir basınç kuvveti uygulamaktadır. Re-entrant kafesin birim hücre kalınlığı her arttığında bu basınç kuvveti de artmaktadır. Bu kuvvet her artışında kafes içerisinde bulunan malzemenin genişlemesini daha fazla kısıtlayıp dayanımını artırmaktadır. Benzer bir davranış Luo et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada da ortaya konmuştur. Bu durum kafes yapıların kalınlıkları arttıkça BDÖ-RE yapısındaki dayanım ve enerji yutma kapasitesindeki artışın, BDG-RG yapısına kıyasla daha fazla olmasını açıklamaktadır.



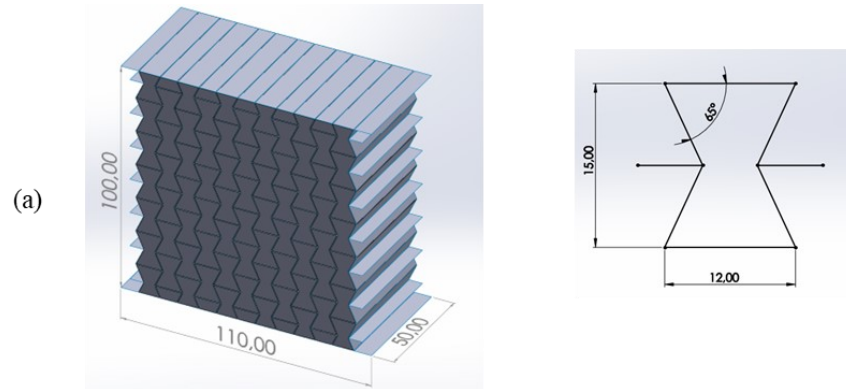
Şekil 4.20. Re-entrant kafes yapısının basınç altında daralma yönünün gösterimi

4.3.2. Birim hücre boyutları

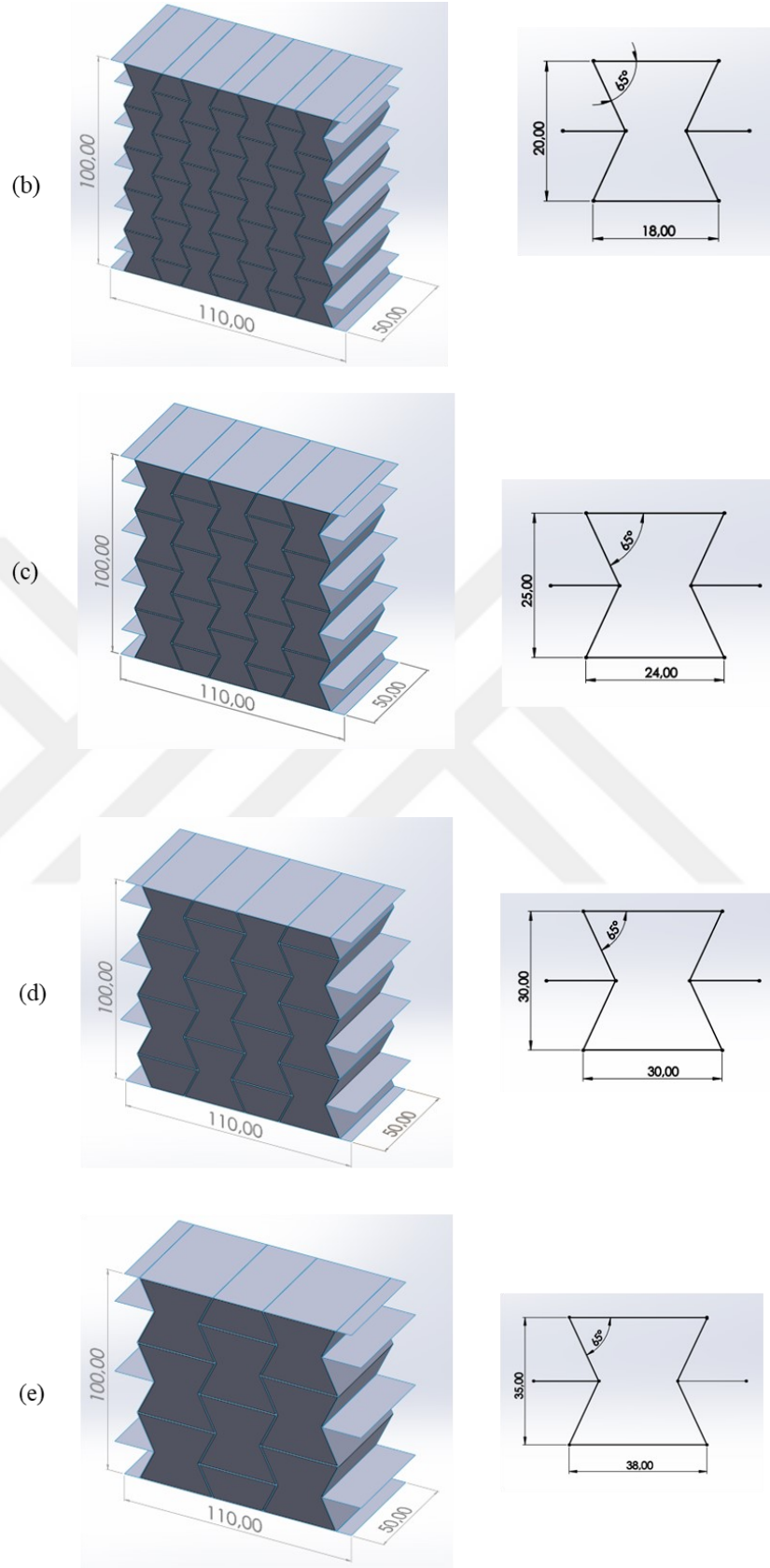
Kafes yapıların birim hücre boyutlarındaki değişikliklerin kafeslerin dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de ayrıntıları belirtilmiş olan BDÖ-RE ve BDG-RG kompozit yapılarının, genel tasarım ölçülerine sadık kalmak suretiyle, yapı içlerindeki kafeslerin birim hücrelerinin boyutları üzerinde parametrik bir çalışma yapılarak yeniden tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapıların, geometrik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE yapıların ve kafeslerin birim hücrelerinin boyutları Şekil 4.21’de, farklı birim hücre boyutuna sahip BDG-RG yapıların ve kafeslerin birim hücrelerinin boyutları ise Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı boyuttaki birim hücreye sahip beton dolgulu kafes yapıların geometrik özellikleri.

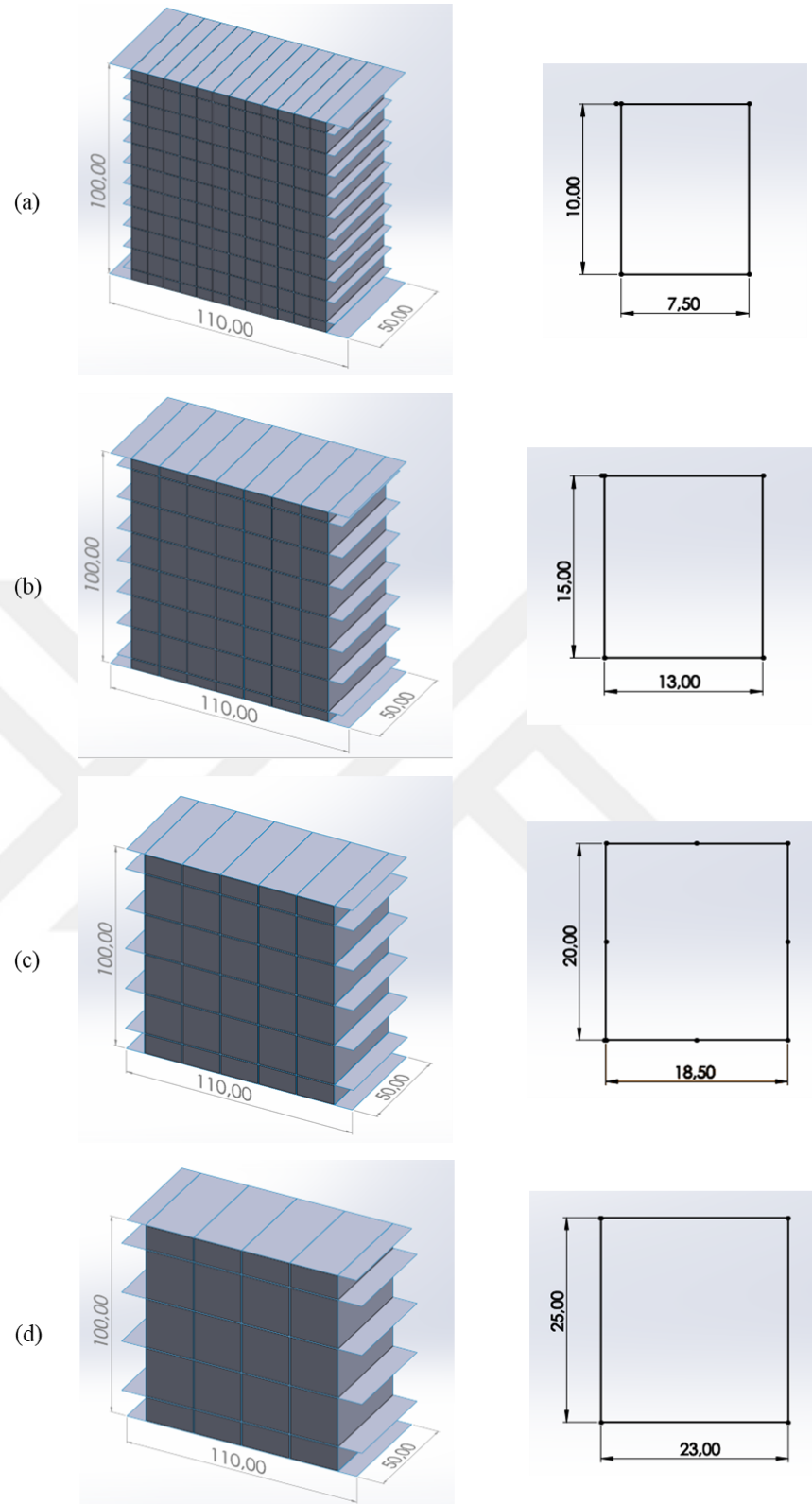
Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Kafes Hacim (mm ³)	Beton Hacim (mm ³)	Kafes Rölatif Yoğunluk (%)	Beton Rölatif Yoğunluk (%)
BDÖ-RE-12/15	0,34	42.161	432.002	7,67	78,55
BDÖ-RE-18/20	0,48	42.017	435.154	7,64	79,12
BDÖ-RE-24/25	0,60	41.581	423.100	7,56	76,93
BDÖ-RE-30/30	0,68	41.537	430205	7,55	78,22
BDÖ-RE-38/35	0,80	41.654	418.563	7,57	76,10
BDG-RG-7,5/10	0,33	41.168	414.583	7,49	75,38
BDG-RG-13/15	0,47	41.078	422.060	7,47	76,74
BDG-RG-18,5/20	0,60	41.250	431.390	7,50	78,43
BDG-RG-23/25	0,70	41.300	430.390	7,51	78,25
BDG-RG-31/35	0,84	41.664	437.199	7,58	79,49



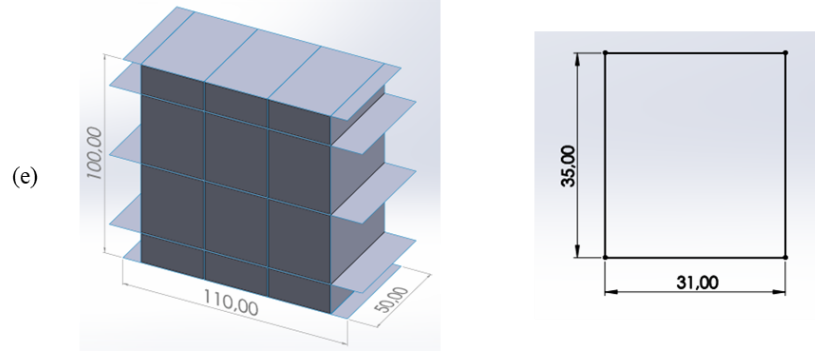
Şekil 4.21. BDÖ-RE kompozitlerin ve birim hücrelerin boyutları: (a) BDÖ-RE-12/15; (b) BDÖ-RE-18/20; (c) BDÖ-RE-24/25 (d) BDÖ-RE-30/30 (e) BDÖ-RE-38/35 (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).



Şekil 4.21. (devam)



Şekil 4.22. BDG-RG kompozitlerin ve birim hücrelerinin boyutları: (a) BDG-RG-7,5/10; (b) BDG-RG-13/15; (c) BDG-RG-18,5/20 (d) BDG-RG-23/25 (e) BDG-RG-31/35 (ölçüler “mm” cinsinden verilmiştir).



Şekil 4.22. (devam)

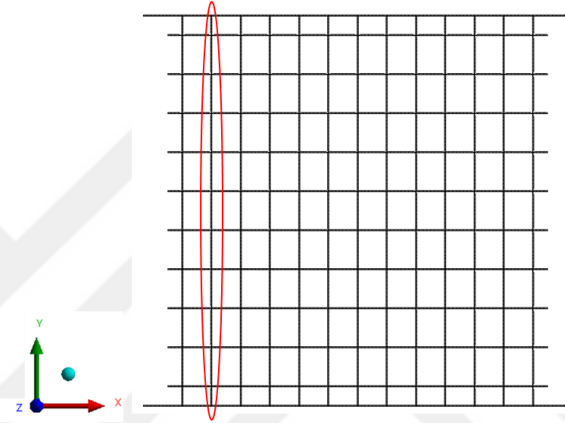
Farklı boyutlarda birim hücreye sahip BDÖ-RE ve BDG-RG kompozitlerindeki kafes yapıların, birim hücre kalınlığı, Poisson oranları ve direngenlikleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların geometrik özellikleri

Kafes Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Poisson Oranı	Direngenlik (N/mm)
Re-Entrant 12/15	0,34	-2,56	1.789,6
Re-Entrant 18/20	0,48	-2,19	1.752,2
Re-Entrant 24/25	0,6	-2,08	1.597,7
Re-Entrant 30/30	0,68	-2,35	1.427,8
Re-Entrant 38/35	0,80	-2,20	1.304,1
Rectangle Grid 7,5/10	0,33	~ 0,00	155.710
Rectangle Grid 13/15	0,47	~ 0,00	136.180
Rectangle Grid 18,5/20	0,6	~ 0,00	129.980
Rectangle Grid 23/25	0,70	~ 0,00	125.900
Rectangle Grid 31/35	0,84	~ 0,00	120.190

Çizelge 4.8 incelendiğinde, re-entrant kafes yapının birim hücre boyutu büyüdükçe öksetikliğinin ve direngenliğinin azaldığı görülmektedir. Öksetik kafes yapılarda, kafesin birim hücre boyutları büyüdükçe yapının öksetikliğinin azalması durumu, Wang et al. (2022) tarafından yapılan çalışmada arrowhead birim hücreli kafes yapı üzerinde de gösterilmiştir. Rectangle grid kafes yapısı incelendiğinde ise kafes yapının Poisson oranında belirgin bir değişikliğe rastlanılmamıştır. Bu kafes yapıların şekil değişimlerinin daha iyi görülebilmesi için otuz kat büyütülmüş, büyük ölçekli görüntüleri Ek-2 kısmında toplu olarak verilmiştir. Çizelge 4.8’ye göre rectangle grid kafes yapıların direngenlikleri karşılaştırıldığında ise rectangle Grid 7,5/10 kafesinin

direngenliğinin en yüksek, rectangle grid 31/35 kafesinin direngenliğinin ise en düşük olduğu saptanmıştır. Şekil 4.23'te Rectangle grid 7,5/10 kafesi üzerinde kırmızı elips içerisinde bir dikey kafes elemanı yapısı gösterilmiştir. Bu kafesin tüm dikey eleman yapılarının hacminin diğer rectangle grid kafeslerin dikey elemanlarının hacmine göre en büyük değere sahip olduğu, rectangle grid 31/35 kafesinin dikey elemanlarının hacminin ise diğer kafeslerin dikey elemanlarının hacmine göre en küçük değere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, farklı birim hücre boyutuna sahip rectangle grid kafeslerinin direngenliklerinin farklı olmasını açıklamaktadır.



Şekil 4.23. Rectangle grid 7,5/10 kafes yapısı

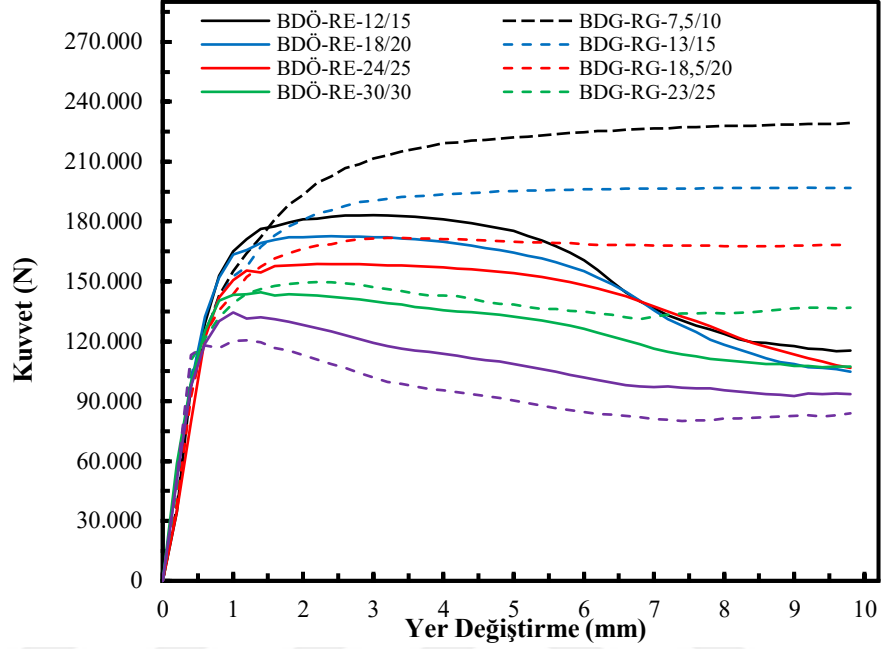
Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Ayrıca, bu kompozit yapıların 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımları Ek-3 kısmında toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.9. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri.

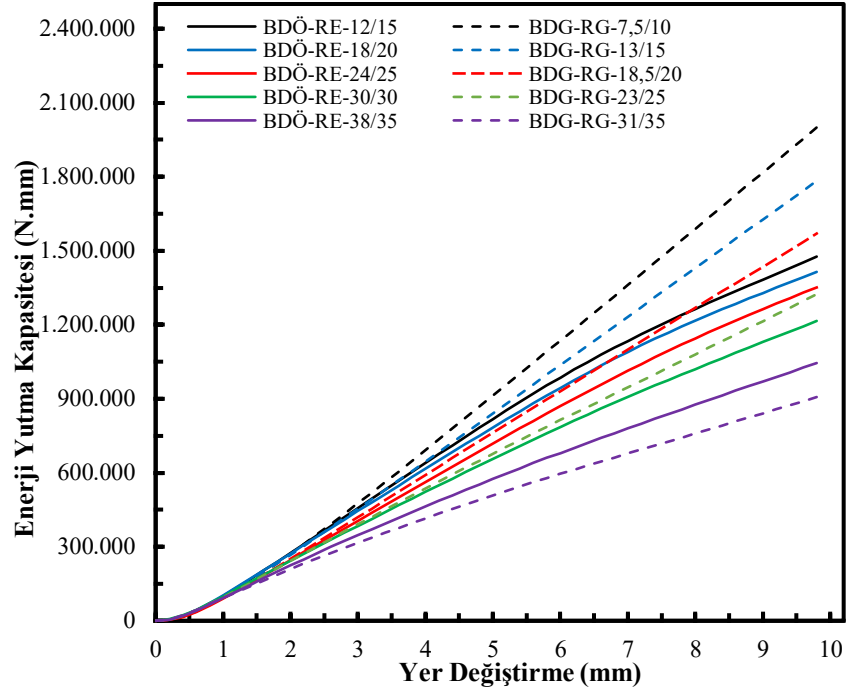
Kompozit Yapılar	Birim Hücre Kalınlığı (mm)	Dayanımı (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (N.m)
BDÖ-RE-12/15	0,34	183,2	1.476,3
BDÖ-RE-18/20	0,48	172,6	1.414,2
BDÖ-RE-24/25	0,60	158,7	1.351,0
BDÖ-RE-30/30	0,68	144,5	1.215,4
BDÖ-RE-38/35	0,80	134,4	1.044,7
BDG-RG-7,5/10	0,33	229,4	1.999,7
BDG-RG-13/15	0,47	196,9	1.783,5
BDG-RG-18,5/20	0,60	171,8	1.569,6
BDG-RG-23/25	0,70	149,5	1.323,8
BDG-RG-31/35	0,84	120,5	907,0

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE ve BDG-RG sayısal modellerinin analizlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri, sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilmiştir.



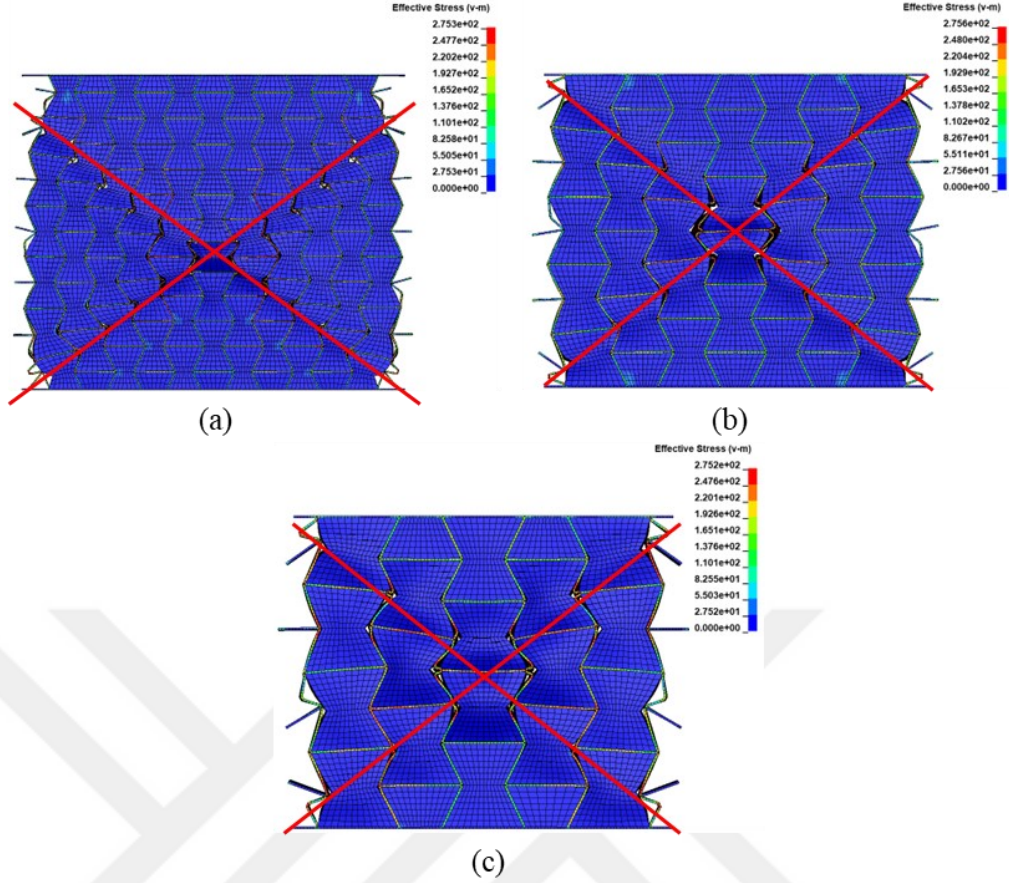
Şekil 4.24. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri.



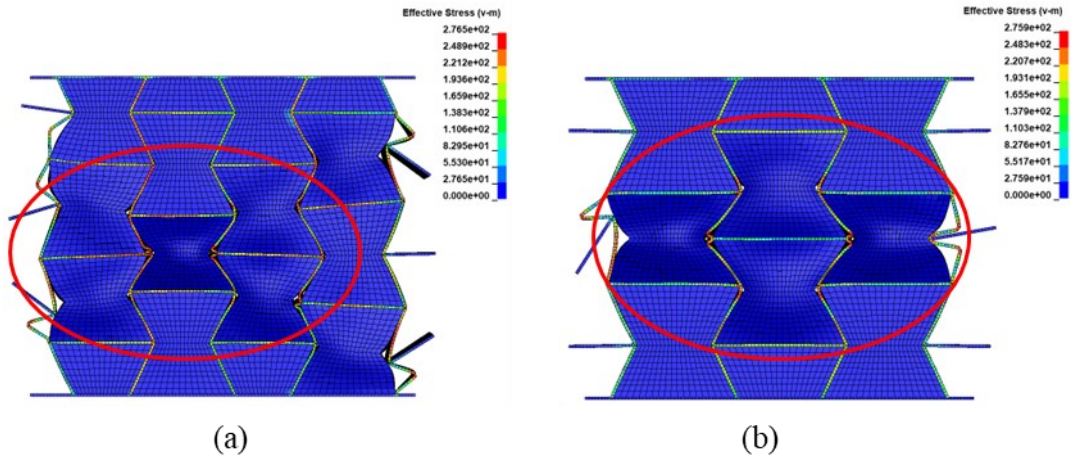
Şekil 4.25. Beton dolgulu, farklı birim hücre boyutuna sahip kafes yapıların enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri.

Çizelge 4.9 incelendiğinde, BDG-RG-7,5/10 yapısının 229,4 kN ile en yüksek dayanıma sahip olduğu görülürken, en düşük dayanımın 120,5 kN ile BDG-RG-31/35 yapısına ait olduğu belirlenmiştir. Bu yapıların enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında ise dayanımlarının karşılaştırmasında olduğu gibi en yüksek enerji yutma kapasitesinin BDG-RG-7,5/10 yapısına ait olduğu görülürken en düşük enerji yutma kapasitesinin ise BDG-RG-31/35 yapısına ait olduğu saptanmıştır. Sadece kafesleri re-entrant olan kompozitler incelendiğinde ise BDÖ-RE-12/15 yapısının 183,2 kN ile en yüksek dayanıma sahip olduğu görülürken, en düşük dayanımın 134,4 kN ile BDÖ-RE-38/35 yapısına ait olduğu belirlenmiştir.

BDÖ-RE ve BDG-RG kompozit yapılarındaki kafeslerin birim hücre boyutunun büyümesiyle, beton ve kafes elemanları arasındaki sürtünme yüzeyi büyük ölçüde azalır ve bu kompozit yapıların dayanımlarının düşmesine neden olur. Şekil 4.26'da verilen BDÖ-RE-12/15, BDÖ-RE-18/20 ve BDÖ-RE-24/25 yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü incelendiğinde, bu yapılarda "X" şeklinde oluşan kesmeye bağlı bir göçme olduğu görülmektedir. Bu durumdaki yapılarda, Şekil 4.24'te yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrilerine bakıldığında, Zhou et al. (2020) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi kesmeye bağlı göçmede ani yük kayıplarının olduğu görülmektedir. Şekil 4.27'da verilen BDÖ-RE-30/30 ve BDÖ-RE-38/35 yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü incelendiğinde, bu yapılarda aksenal basınca bağlı bir göçme olduğu görülmektedir. Bu durumun, Şekil 4.24'te yapıların kuvvet-yer değiştirme eğrilerine bakıldığında, söz konusu kompozit yapılardaki yük kayıplarının daha küçük değerlerde devam etmesinin nedeni olduğu düşünülmektedir.

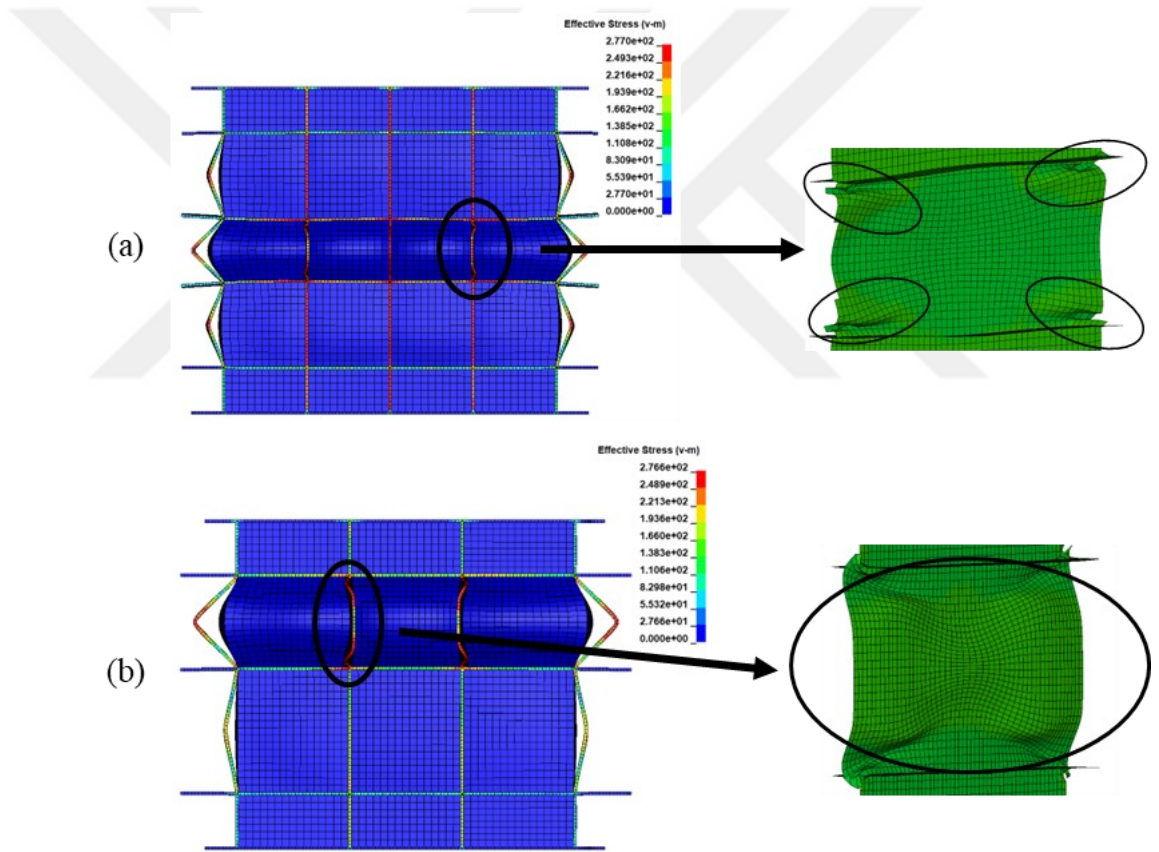


Şekil 4.26. Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kesmeye bağlı oluşan “X” şeklindeki göçmenin görüntüsü: (a) BDÖ-RE-12/15; (b) BDÖ-RE-18/20; (c) BDÖ-RE-24/25.



Şekil 4.27. Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RE kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve eksenel basınca bağlı göçmenin olduğu beton elemanlarının görüntüsü: (a) BDÖ-RE-30/30; (b) BDÖ-RE-38/35.

Şekil 4.24'te verilen BDG-RG-7,5/10, BDG-RG-13/15 ve BDG-RG-18,5/20 yapılarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapılarda herhangi bir göçme olmadan yapıların dayanımının arttığı görülmektedir. Bununla birlikte BDÖ-RG-23/25 ve BDÖ-RG-31/35 yapılarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde ise yapıların tepki kuvveti dayanım seviyesine ulaştıktan sonra yapılara uygulanan yer değiştirme arttıkça yapıların yük kaybettiği görülmektedir. Şekil 4.28 incelendiğinde, BDÖ-RG-23/25 ve BDÖ-RG-31/35 yapılarında diğer birim hücre boyutu farklı olan BDÖ-RG yapılarının aksine kafes iç kısımlarında bulunan elemanlarının da burkulduğu görülmektedir. Kompozit yapının içerisindeki bu burkulmaların, BDÖ-RG-23/25 ve BDÖ-RG-31/35 yapılarındaki yük kayıplarına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.28. Farklı birim hücre boyutuna sahip BDÖ-RG kompozit yapılarının 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının ve kompozit yapıların kafeslerindeki burkulan parçaların görüntüsü (a) BDÖ-RG-23/25; (b) BDÖ-RG-31/35.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak beton dolgulu öksetik ve geleneksel kompozit yapıların aksenal basınç altındaki yapısal davranışı nümerik olarak incelenmiştir. İlk kısımda beton dolgulu kafeslerin tasarımları yapılmıştır. Bu yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulmadan önce modellerin doğruluğunu test etmek amacıyla bir doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, bu yapıların basınç altındaki kuvvet-yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. Son kısımda ise en yüksek dayanıma ve enerji yutma kapasitesi sahip birer BDÖ ve BDG kompozit yapının birim hücre kalınlığı ve birim hücre boyutu üzerine parametrik bir çalışma yapılmış ve bu çalışmanın sonuçları irdelenmiştir.

Sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları ve değerlendirmeleri aşağıda özetlenmiştir.

- Öksetik kafeslerde en büyük öksetikliğe ve yüksek direngenliğe re-entrant kafes yapısının sahip olduğu görülürken, en küçük öksetikliğin star honeycomb kafesine, en düşük direngenliğin ise Formed Square Grid kafesine ait olduğu belirlenmiştir.
- Geleneksel kafeslerde en küçük öksetikliğe ve en yüksek direngenliğe rectangle grid kafes yapısının sahip olduğu görülürken, en yüksek Poisson oranının ve en düşük direngenliğin honeycomb kafes yapısına ait olduğu saptanmıştır.
- Beton dolgulu kafesler incelendiğinde, BDG-RG yapısının en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.
- Sadece BDÖ yapılar incelendiğinde ise en yüksek direngenliğe ve öksetikliğe sahip olan BDÖ-RE kompozit yapısının en yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

- Re-entrant kafes yapılarında birim hücre kalınlığı arttıkça öksetikliğinin düştüğü, direngenliğinin ise üstel olarak yükseldiği gözlemlenmiştir. Rectangle Grid kafes yapılarında birim hücre kalınlığı arttıkça Poisson oranının sabit kaldığı, direngenliğinin ise doğrusal olarak arttığı saptanmıştır.
- BDÖ-RE ve BDG-RG yapılarındaki kafeslerin birim hücre kalınlığı arttıkça, her iki kompozitinde dayanım ve enerji yutma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu kompozitlerdeki kafeslerin her kalınlık artışında BDÖ-RE yapısının dayanımındaki ve enerji yutma kapasitesindeki artışın BDG-RG yapısının dayanımındaki ve enerji yutma kapasitesindeki artıştan daha fazla olduğu görülmüştür.
- Re-entrant kafesinin birim hücre boyutu arttığında, kafes yapının hem öksetikliğinin hem de direngenliğinin düştüğü saptanmıştır. Rectangle grid kafesinin birim hücre boyutu büyüdüğünde ise Poisson oranının bir değişimin olmadığı, bu kafes yapının direngenliğinin yapıdaki dikey kafes elemanlarının hacimlerine bağlı olduğu anlaşılmıştır.
- BDÖ-RE ve BDG-RG yapılarındaki kafeslerin birim hücre boyutu arttıkça, kafes ve beton arasındaki sürtünme yüzeyinin azalmasıyla dayanımlarında ve enerji yutma kapasitelerinde kayıp yaşandığı görülmektedir. Özellikle BDG-RG yapılarında, yapıya uygulanan ileri deformasyonlarda kompozit yapıdaki betonların parçalanmasıyla birlikte birim hücre boyutu büyük olan kafeslerin dikey elemanlarında burkulma olasılığının arttığı belirlenmiştir.
- Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, BDÖ-RE kompozit yapısındaki kafesin birim hücre boyutunun belirli bir kalınlıkta ve boyutta olduğu durumda, geleneksel kafes yapıya sahip olan BDG-RG kompozitinden daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.
- İleriki çalışmalarda, beton dolgulu öksetik kafeslerin daha iyi mekanik davranış gösterebilmesi için kafesin birim hücre boyutu ve kalınlığı üzerine bir optimizasyon çalışmasının yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Airoldi, A., Bettini, P., Panichelli, P., Oktem, M. F. and Sala, G. 2015. Chiral topologies for composite morphing structures–Part I: Development of a chiral rib for deformable airfoils. *Physica Status Solidi (b)*, 252(7), 1435-1445.
- Airoldi, A., Novak, N., Sgobba, F., Gilardelli, A. and Borovinšek, M. 2020. Foam-filled energy absorbers with auxetic behaviour for localized impacts. *Materials Science and Engineering: A*, 788, 139500.
- Aksu, U. 2016 Negatif Poisson oranına sahip (auxetic) fiber ağ örgü yapıların mekanik özelliklerinin çeşitli parametrelere göre nümerik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 71, Osmaniye.
- Albertini, F., Dirrenberger, J., Sollogoub, C., Maconachie, T., Leary, M. and Molotnikov, A. 2021. Experimental and computational analysis of the mechanical properties of composite auxetic lattice structures. *Additive Manufacturing*, 47, 102351.
- Alderson, A. and Alderson, K. L. 2007. Auxetic materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4), 565-575.
- Alderson, K. L. 2012. Progress in auxetic fibres and textiles. *l'actualité Chimique*, 1, 360-361.
- 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.
- Anonymous, 2022a. Ansys Meshing User's Guide, Release 2022 R2, Help System; Ansys. Inc, Canonsburg, PA, USA
- Arifurrahman, F., Critchley, R. and Horsfall, I. 2021. Experimental and numerical study of auxetic sandwich panels on 160 grams of PE4 blast loading. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 23(8), 3902-3931.
- Basurto-Vázquez, O., Sánchez-Rodríguez, E. P., McShane, G. J. and Medina, D. I. 2021. Load distribution on PET-G 3D prints of honeycomb cellular structures under compression load. *Polymers*, 13(12), 1983.
- Bitzer, T. N. 1997. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science and Business Media, 233, Switzerland.
- Brighenti, R. 2014. Smart behaviour of layered plates through the use of auxetic materials. *Thin-Walled Structures*, 84, 432-442.

- Budarapu, P. R., YB, S. S. and Natarajan, R. 2016. Design concepts of an aircraft wing: composite and morphing airfoil with auxetic structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(4), 394-408.
- Bukhari, F., Ansari, U., Najabat Ali, M., Akhtar, H., Asif, S., Mohammad, U. and Mir, M. 2017. A biaxial strain-based expansion mechanism for auxetic stent deployment. *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, 15(3), 196-205.
- Chen, X. Y., Hamdi, O. and Rodrigue, D. 2023. Conversion of low density polyethylene foams into auxetic metamaterials. *Polymers for Advanced Technologies*, 34(1), 228-237.
- Choi, J. B. and Lakes, R. S. 1996. Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis. *International Journal of fracture*, 80(1), 73-83.
- Chowdhury, M. 1985. Plastic collapse theory for rectangular grid. *International Journal of Mechanical Sciences*, 27(3), 145-155.
- Ehsani, A. and Dalir, H. 2019. Influence of employing laminated isogrid configuration on mechanical behavior of grid structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(16), 777-785.
- Elchalakani, M., Ayough, P. and Yang, B. 2021. Single skin and double skin concrete filled tubular structures: analysis and design. Woodhead Publishing, 825, UK.
- Elipe, J. C. Á. and Lantada, A. D. 2012. Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering. *Smart Materials and Structures*, 21(10), 105004.
- Erden, Ş. 2020. İki ve üç boyutlu öksetik yapıların mekanik özelliklerinin analitik olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 78, Erzurum.
- Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J. and Rogers, S. C. 1991. Molecular network design. *Nature*, 353(6340), 124-124.
- Farrokhbabadi, A., Veisi, H., Gharehbaghi, H., Montesano, J., Behraves, A. H. and Hedayati, S. K. 2021. Investigation of the energy absorption capacity of foam-filled 3D-printed glass fiber reinforced thermoplastic auxetic honeycomb structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-12.
- Gao, Y. K. 2021. Auxetic metamaterials and structures. *Cailiao Gongcheng/Journal Mater Eng* 49,38-47.
- Gatt, R., Wood, M. V., Gatt, A., Zarb, F., Formosa, C., Azzopardi, K. M., Casha, A., Agius, T. P., Schembri-Wismayer, P., Attard, L., Chockalingam, N. and Grima, J. N. 2015. Negative Poisson's ratios in tendons: an unexpected mechanical response. *Acta Biomaterialia*, 24, 201-208.

- Gercek, H. 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 1-13.
- Greaves, G. N., Greer, A. L., Lakes, R. S. and Rouxel, T. 2011. Poisson's ratio and modern materials. *Nature Materials*, 10(11), 823-837.
- Grima, J. N., Gatt, R., Zammit, V., Williams, J. J., Evans, K. E., Alderson, A. and Walton, R. I. 2007. Natrolite: A zeolite with negative Poisson's ratios. *Journal of Applied Physics*, 101(8).
- Grimmelsmann, N., Meissner, H. and Ehrmann, A. 2016. 3D printed auxetic forms on knitted fabrics for adjustable permeability and mechanical properties. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 137(1), 012011.
- Gupta, K. K. and Meek, J. L. 1996. A brief history of the beginning of the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(22), 3761-3774.
- Hassani, S., Mousavi, M. and Gandomi, A. H. 2021. Structural health monitoring in composite structures: a comprehensive review. *Sensors*, 22(1), 153.
- Heo, H., Ju, J. and Kim, D. M. 2013. Compliant cellular structures: application to a passive morphing airfoil. *Composite Structures*, 106, 560-569.
- Imbalzano, G., Linforth, S., Ngo, T. D., Lee, P. V. S. and Tran, P. 2018. Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs. *Composite Structures*, 183, 242-261.
- İkibeş, S. 2022. Savaş tarihine yön veren silah: türk kompozit yayı ve tamamlayıcı unsurları. *Journal of Universal History Studies*, 5(1), 32-50.
- Jiang, H. and Zhao, J. 2015. Calibration of the continuous surface cap model for concrete. *Finite Elements in Analysis and Design*, 97, 1-19.
- Jin, X., Jin, T., Su, B., Wang, Z., Ning, J. and Shu, X. 2017. Ballistic resistance and energy absorption of honeycomb structures filled with reactive powder concrete prisms. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 19(5), 544-571.
- Johnson, A. F. and Sims, G. D. 1986. Mechanical properties and design of sandwich materials. *Composites*, 17(4), 321-328.
- Kalubadanage, D., Remennikov, A., Ngo, T. and Qi, C. 2021. Close-in blast resistance of large-scale auxetic re-entrant honeycomb sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 23(8), 4016-4053.
- Keskar, N. R. and Chelikowsky, J. R. 1992. Negative Poisson ratios in crystalline SiO₂ from first-principles calculations. *Nature*, 358(6383), 222-224.
- Kolken, H. M. and Zadpoor, A. A. 2017. Auxetic mechanical metamaterials. *RSC Advances*, 7(9), 5111-5129.

- Kollar, L. P. and Springer, G. S. 2003. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge University Press, 480, UK.
- Köster, W. and Franz, H. 1961. Poisson's ratio for metals and alloys. *Metallurgical Reviews*, 6(1), 1-56.
- Lan, X., Feng, S., Huang, Q. and Zhou, T. 2019. A comparative study of blast resistance of cylindrical sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. *Aerospace Science and Technology*, 87, 37-47.
- Lan, X., Wu, G. and Huang, G. 2022. In-plane compression response of foam filled re-entrant auxetic structure. *Applied Composite Materials*, 29(6), 2245-2263.
- Lee, J. W., Soman, P., Park, J. H., Chen, S. and Cho, D. W. 2016. A tubular biomaterial construct exhibiting a negative Poisson's ratio. *PLoS One*, 11(5), e0155681.
- Lees, C., Vincent, J. F. and Hillerton, J. E. 1991. Poisson's ratio in skin. *Bio-medical Materials and Engineering*, 1(1), 19-23.
- Li, T., Chen, Y., Hu, X., Li, Y. and Wang, L. 2018. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials and Design*, 142, 247-258.
- Ltsc, L. D. 2014. *Keyword User's Manual Volume II-Material Models*. Livermore Software, 887, 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.
- Luo, H. C., Ren, X., Zhang, Y., Zhang, X. Y., Zhang, X. G., Luo, C., Cheng, X. and Xie, Y. M. 2022. Mechanical properties of foam-filled hexagonal and re-entrant honeycombs under uniaxial compression. *Composite Structures*, 280, 114922.
- Ma, L., Chen, Y. L., Yang, J. S., Wang, X. T., Ma, G. L., Schmidt, R. and Schröder, K. U. 2018. Modal characteristics and damping enhancement of carbon fiber composite auxetic double-arrow corrugated sandwich panels. *Composite Structures*, 203, 539-550.
- Madke, R. R. and Chowdhury, R. 2020. Anti-impact behavior of auxetic sandwich structure with braided face sheets and 3D re-entrant cores. *Composite Structures*, 236, 111838.
- Mao, L., Pan, T., Ke, Y., Yan, Z., Huang, S., Guo, D., Gao, N., Huang, W., Yao, G., Gao M. and Lin, Y. 2022. Configurable direction sensitivity of skin-mounted microfluidic strain sensor with auxetic metamaterial. *Lab on a Chip*, 22(8), 1630-1639.

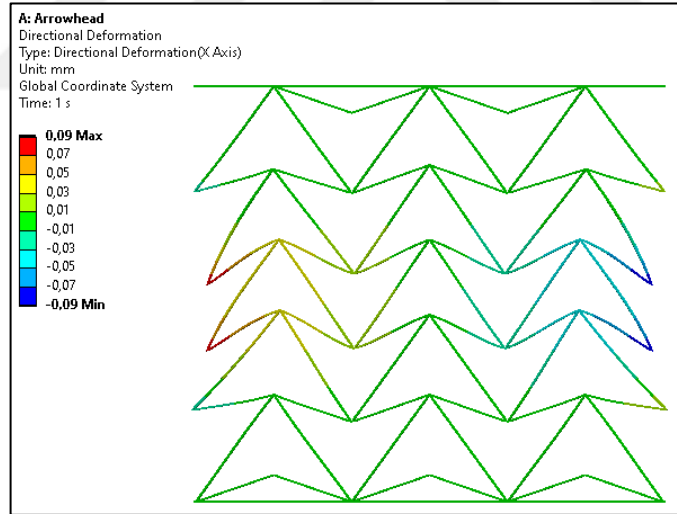
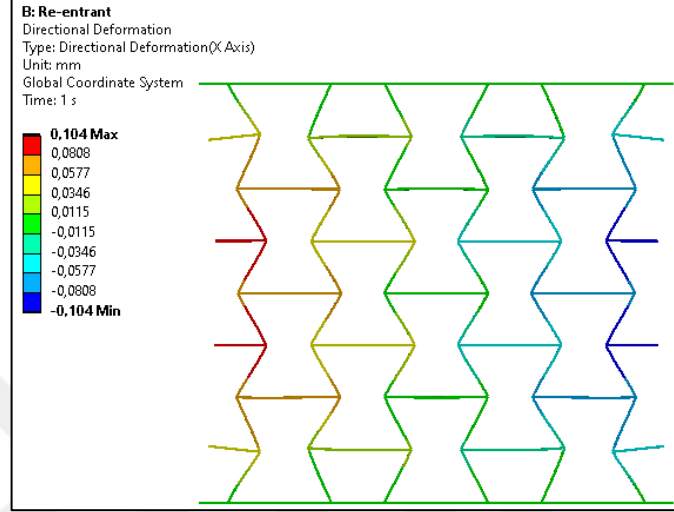
- Meena, K. and Singamneni, S. 2019. A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials and Design*, 173, 107779.
- Novak, N., Starčević, L., Vesenjaj, M. and Ren, Z. 2019. Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core. *Composite Structures*, 210, 167-178.
- Ohsaki, Y. and Iwasaki, R. 1973. On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. *Soils and Foundations*, 13(4), 61-73.
- Okumura, T., Takahashi, R., Hagita, K., King, D. R. and Gong, J. P. 2021. Improving the strength and toughness of macroscale double networks by exploiting Poisson's ratio mismatch. *Scientific Reports*, 11(1), 1-13.
- Park, K. S. 2017. Stents for transcatheter aortic valve replacement. Master's thesis, University of Cape Town, Department of Human Biology, 202, South Africa.
- Pastuszak, P. D. and Muc, A. 2013. Application of composite materials in modern constructions. *Key Engineering Materials*, 542, 119-129.
- Peng, X. L., Soyarslan, C. and Bargmann, S. 2020. Phase contrast mediated switch of auxetic mechanism in composites of infilled re-entrant honeycomb microstructures. *Extreme Mechanics Letters*, 35, 100641.
- Ravirala, N., Alderson, K. L., Davies, P. J., Simkins, V. R. and Alderson, A. 2006. Negative Poisson's ratio polyester fibers. *Textile Research Journal*, 76(7), 540-546.
- Ren, X., Das, R., Tran, P., Ngo, T. D. and Xie, Y. M. 2018. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart Materials and Structures*, 27(2), 023001.
- 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.
- Rosewitz, J. A., Choshali, H. A. and Rahbar, N. 2019. Bioinspired design of architected cement-polymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 96, 252-265.
- Sabat, L. and Kundu, C. K. 2021. History of finite element method: a review. *Recent Developments in Sustainable Infrastructure*, 395-404.
- Shah, I. A., Khan, R., Kolor, S. S. R., Petru, M., Badshah, S., Ahmad, S. and Amjad, M. 2022. Finite element analysis of the ballistic impact on auxetic sandwich composite human body armor. *Materials*, 15(6), 2064.
- Sloan, M. R., Wright, J. R. and Evans, K. E. 2011. The helical auxetic yarn—a novel structure for composites and textiles; geometry, manufacture and mechanical properties. *Mechanics of Materials*, 43(9), 476-486.

- 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.
- Stan, M., Visileanu, E., Ene, A. and Mihai, C. 2010. Applications of auxetic textile structures in the industry and society. *Industria Textila*, 61(5), 232-235.
- Şahin, Y. 2000. *Kompozit Malzemelere Giriş*. Gazi kitabevi, 436, Ankara.
- Tahir, D., Zhang, M. and Hu, H. 2022. Auxetic materials for personal protection: a review. *Physica Status Solidi (b)*, 2200324.
- Tzortzinis, G., Gross, A. and Gerasimidis, S. 2022. Auxetic boosting of confinement in mortar by 3D reentrant truss lattices for next generation steel reinforced concrete members. *Extreme Mechanics Letters*, 52, 101681.
- Usta, F., Türkmen, H. S. and Scarpa, F. 2021. Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures. *Thin-Walled Structures*, 163, 107738.
- Veerabagu, U., Palza, H. and Quero, F. 2022. Auxetic polymer-based mechanical metamaterials for biomedical applications. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 8(7), 2798-2824.
- Vigliotti, A. and Pasini, D. 2015. Analysis and design of lattice materials for large cord and curvature variations in skin panels of morphing wings. *Smart Materials and Structures*, 24(3), 037006.
- Vijay, N., Rajkumara, V. and Bhattacharjee, P. 2016. Assessment of composite waste disposal in aerospace industries. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 563-570.
- Wang, Z. and Hu, H. 2014. Auxetic materials and their potential applications in textiles. *Textile Research Journal*, 84(15), 1600-16117
- Wang, Z., Zulifqar, A. and Hu, H. 2016. Auxetic composites in aerospace engineering. In *Advanced Composite Materials For Aerospace Engineering*, 213-240.
- Wang, Y. C., Lai, H. W. and Ren, X. J. 2020. Enhanced auxetic and viscoelastic properties of filled reentrant honeycomb. *Physica Status Solidi (b)*, 257(10), 1900184.
- Wang, T., Xie, Y., Wang, L., Zhang, X. and Ma, Z. 2022. Size effects of elastic properties for auxetic cellular structures: bending energy-based method. *Materials Today Communications*, 31, 103585.
- 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

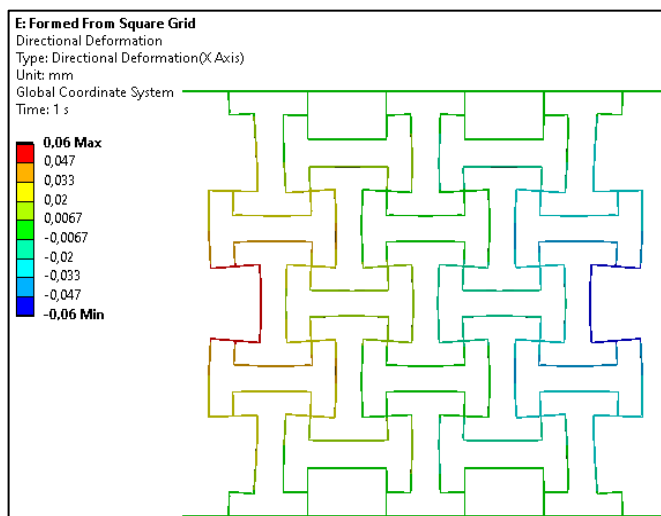
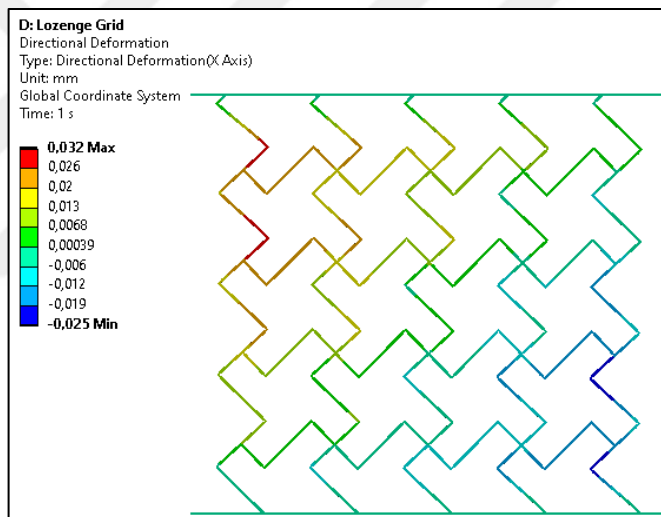
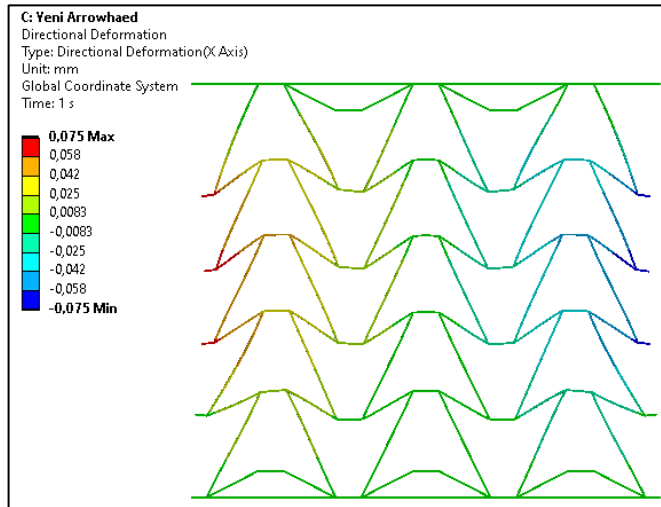
- Xue, Y., Wang, W. and Han, F. 2019. Enhanced compressive mechanical properties of aluminum based auxetic lattice structures filled with polymers. *Composites Part B: Engineering*, 171, 183-191.
- Xue, H., Luo, Z., Brown, T. and Beier, S. 2020. Design of self-expanding auxetic stents using topology optimization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 736.
- 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.
- Yan, X., Wang, R., Chen, Y., Cheng, Y. and Liang, X. 2021. Energy absorption characteristics of honeycomb materials with negative poisson's ratio. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1040(1), 012002.
- Yang, S., Chalivendra, V. B. and Kim, Y. K. 2017. Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar®/Epoxy laminated composites. *Composite Structures*, 168, 120-129.
- Yanping, L. and Hong, H. 2010. A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 5(10), 1052-1063.
- Yastımoğlu, F. and Özkan, A. 2017. Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Yu, R., Luo, W., Yuan, H., Liu, J., He, W. and Yu, Z. 2020. Experimental and numerical research on foam filled re-entrant cellular structure with negative Poisson's ratio. *Thin-Walled Structures*, 153, 106679.
- Zhang, S. L., Lai, Y. C., He, X., Liu, R., Zi, Y. and Wang, Z. L. 2017. Auxetic foam-based contact-mode triboelectric nanogenerator with highly sensitive self-powered strain sensing capabilities to monitor human body movement. *Advanced Functional Materials*, 27(25), 1606695.
- 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.

EKLER

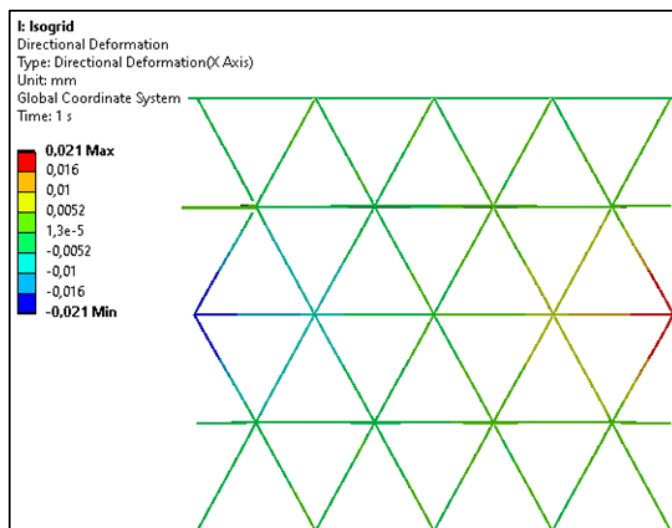
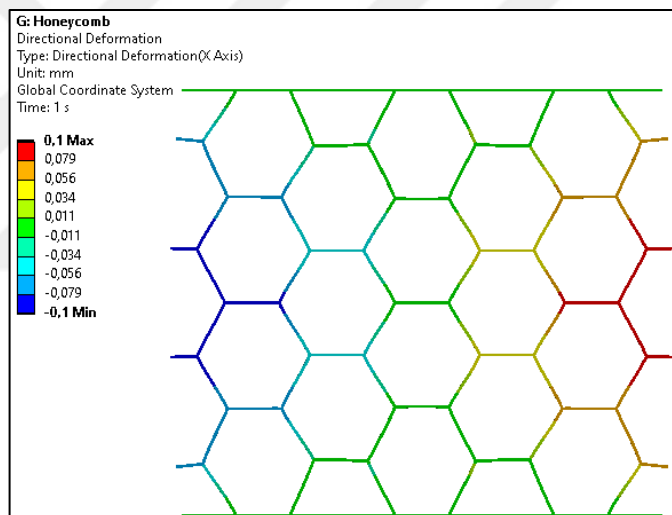
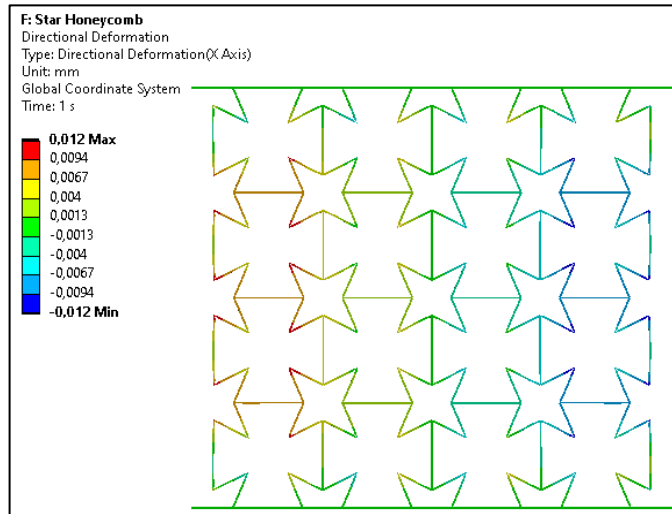
EK-1 Çizelge 4.2’de verilen kafes yapıların otuz kat büyütülmüş, büyük ölçekli şekil değiştirme görüntüleri



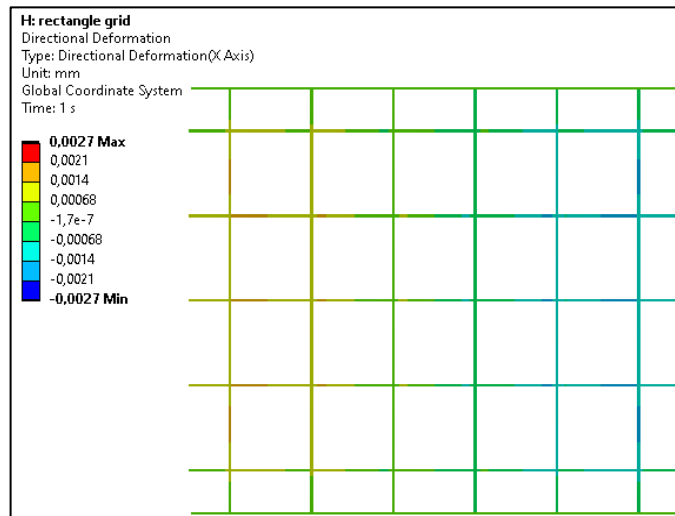
EK-1 (devam)



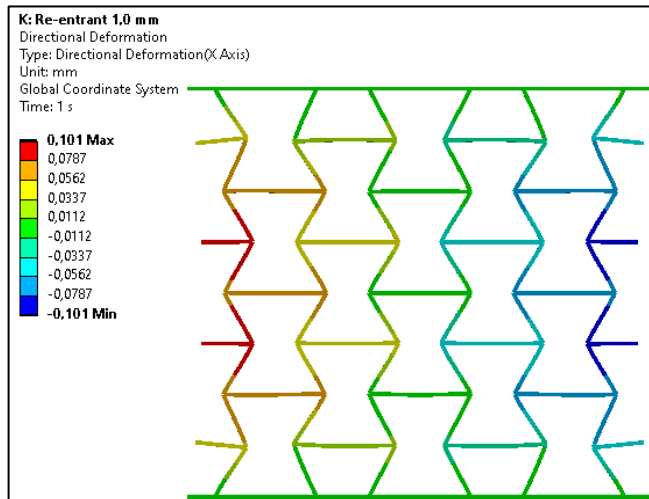
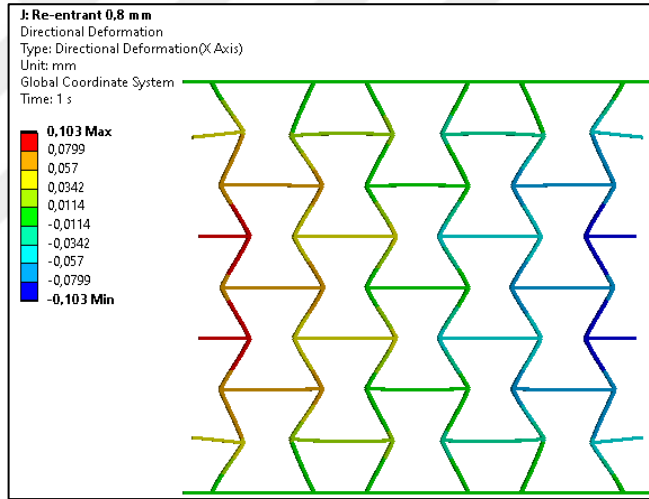
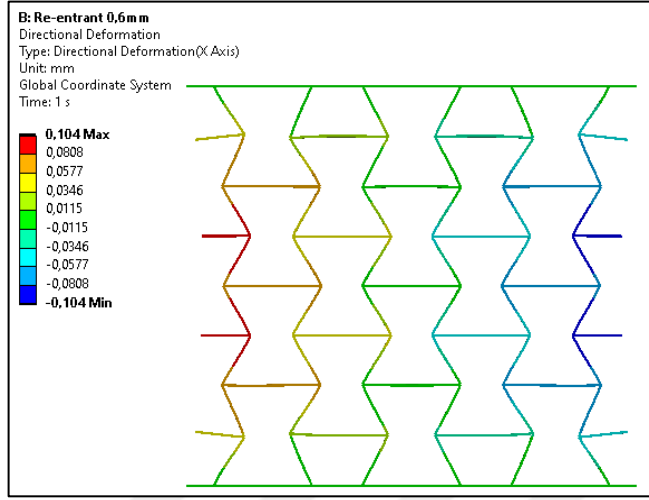
EK-1 (devam)



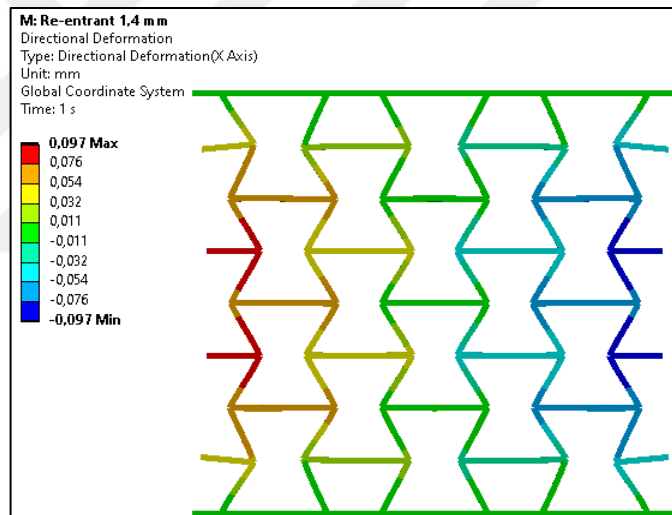
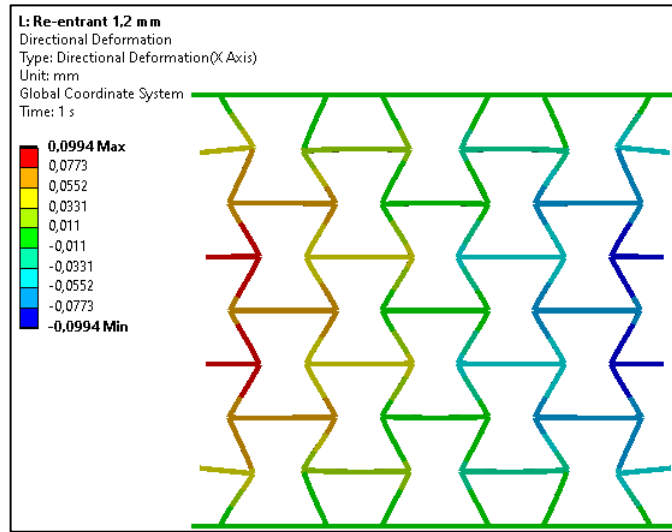
EK-1 (devam)



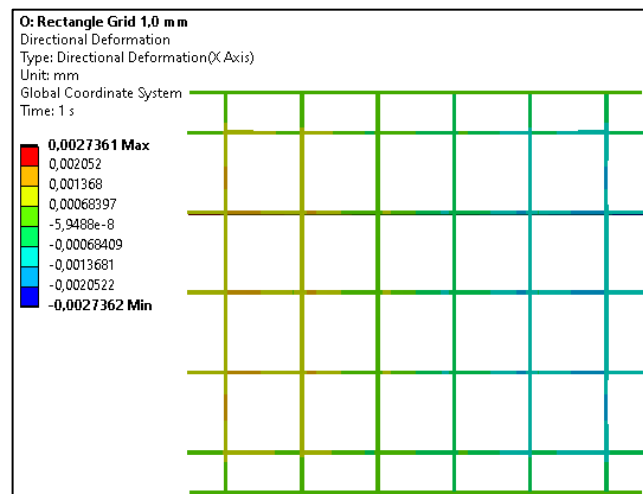
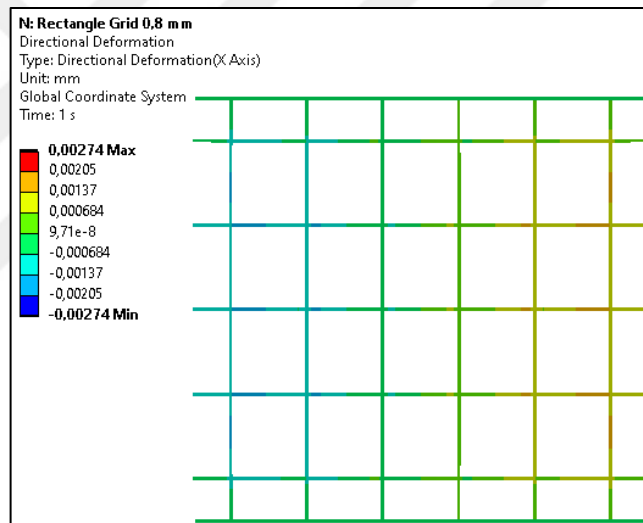
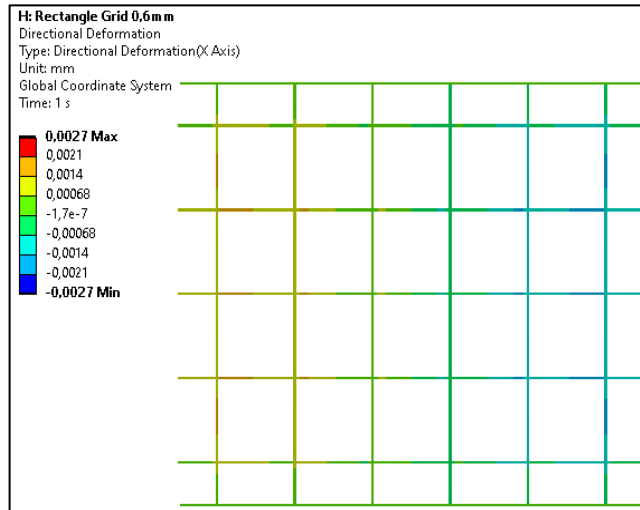
EK-2 Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.8’de verilen kafes yapıların otuz kat büyütülmüş, büyük ölçekli şekil değiştirme görüntüleri



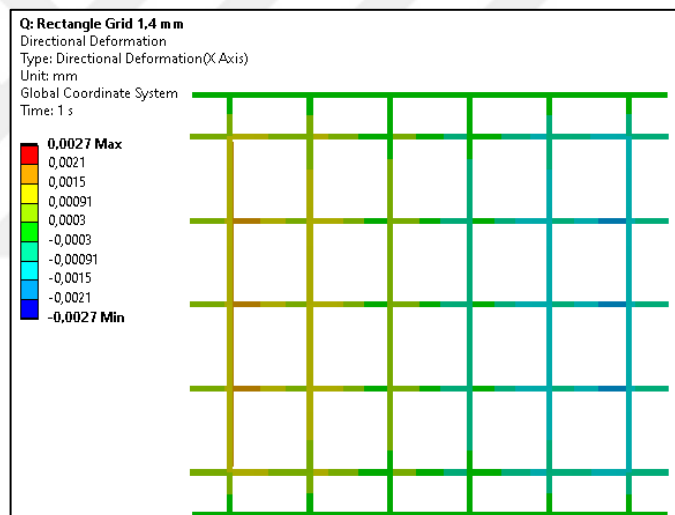
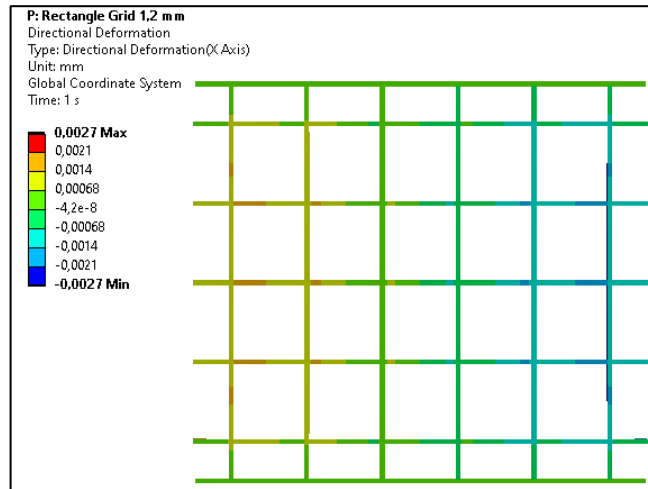
EK-2 (devam)



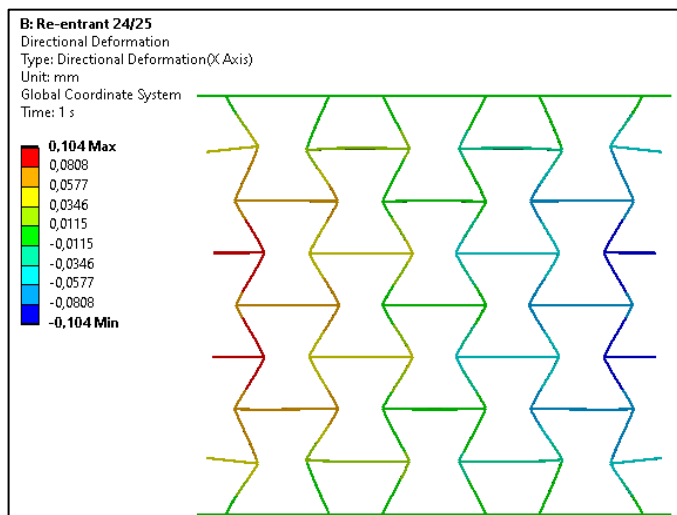
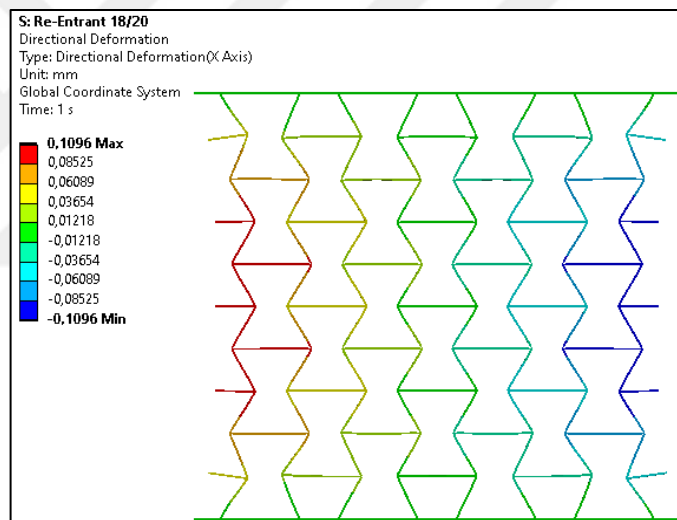
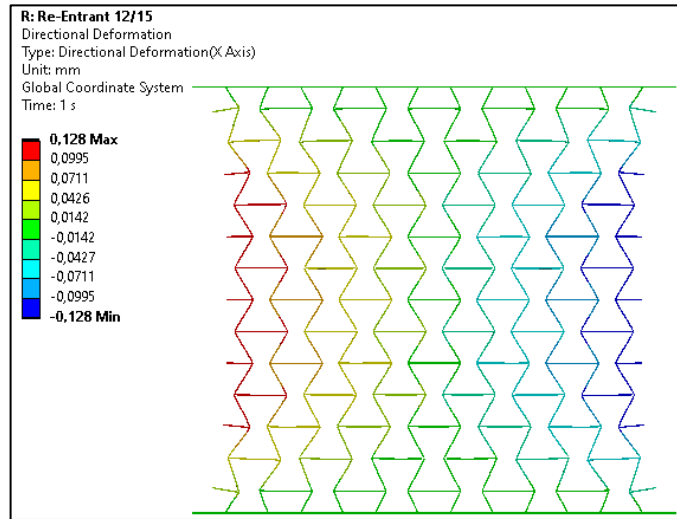
EK-2 (devam)



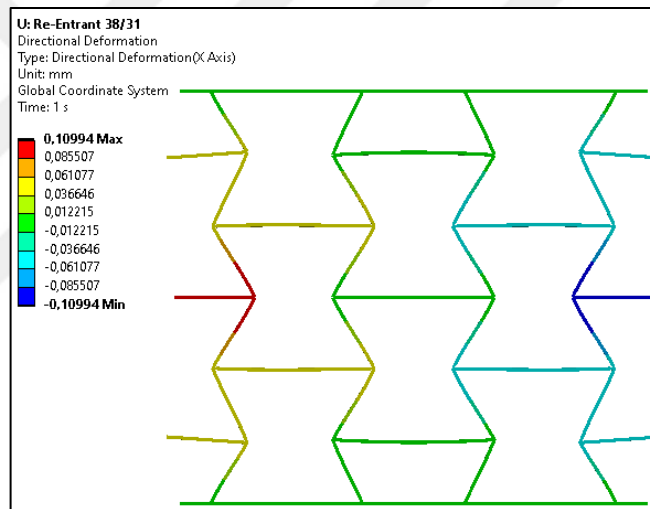
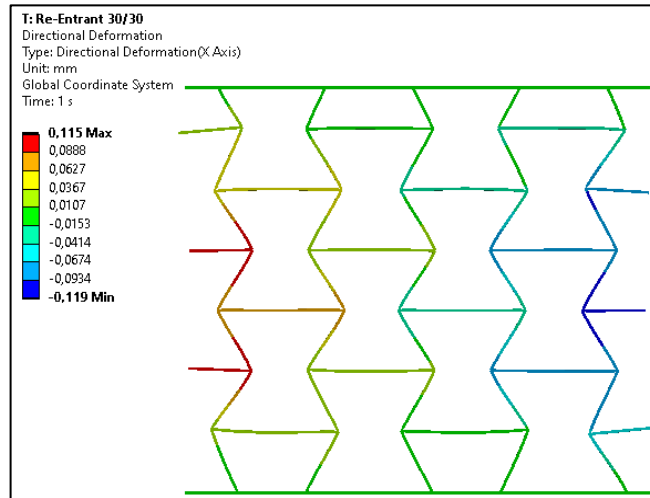
EK-2 (devam)



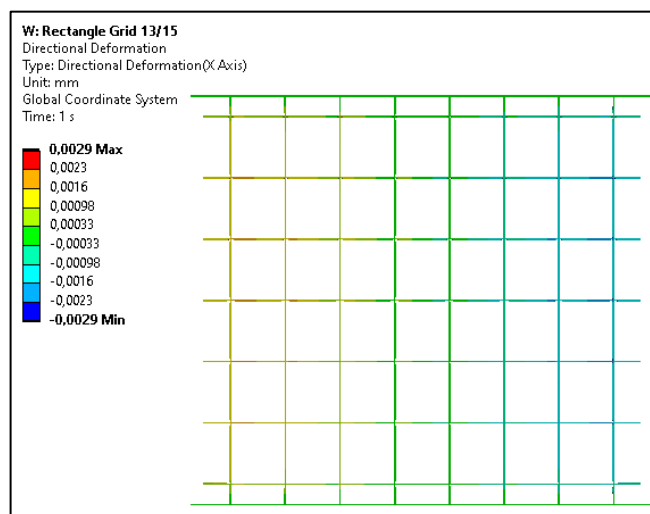
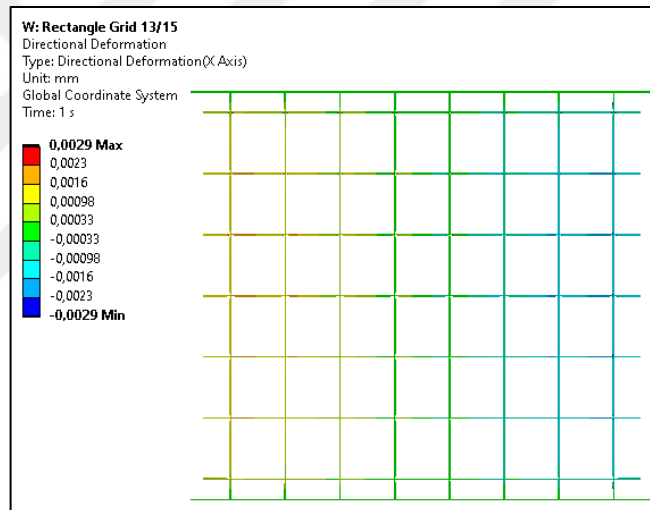
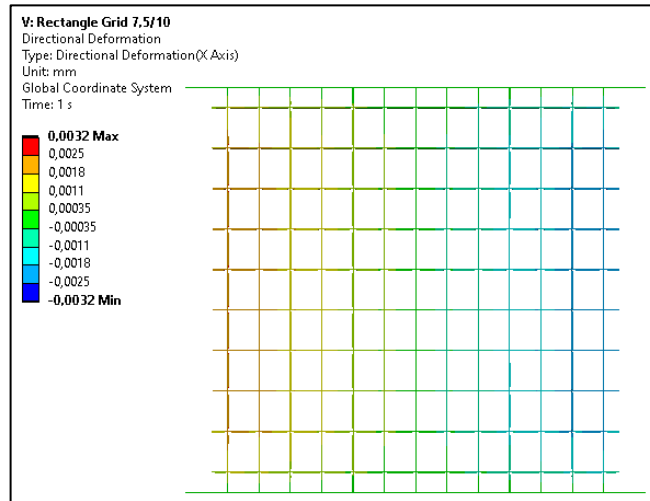
EK-2 (devam)



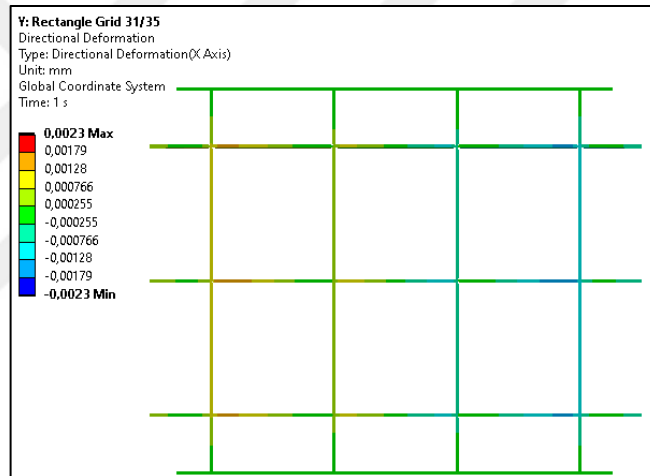
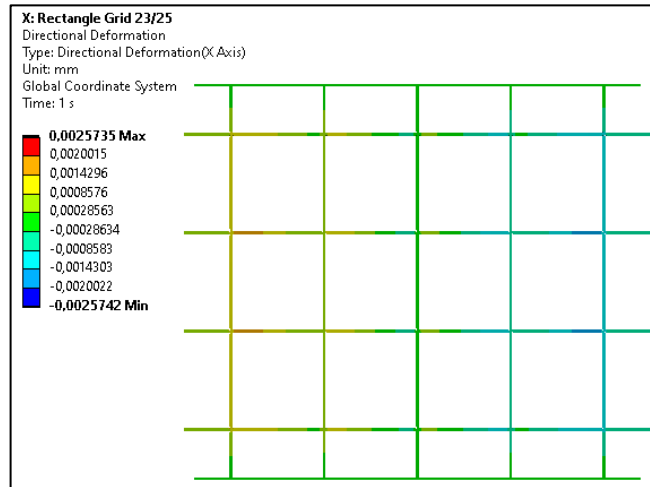
EK-2 (devam)



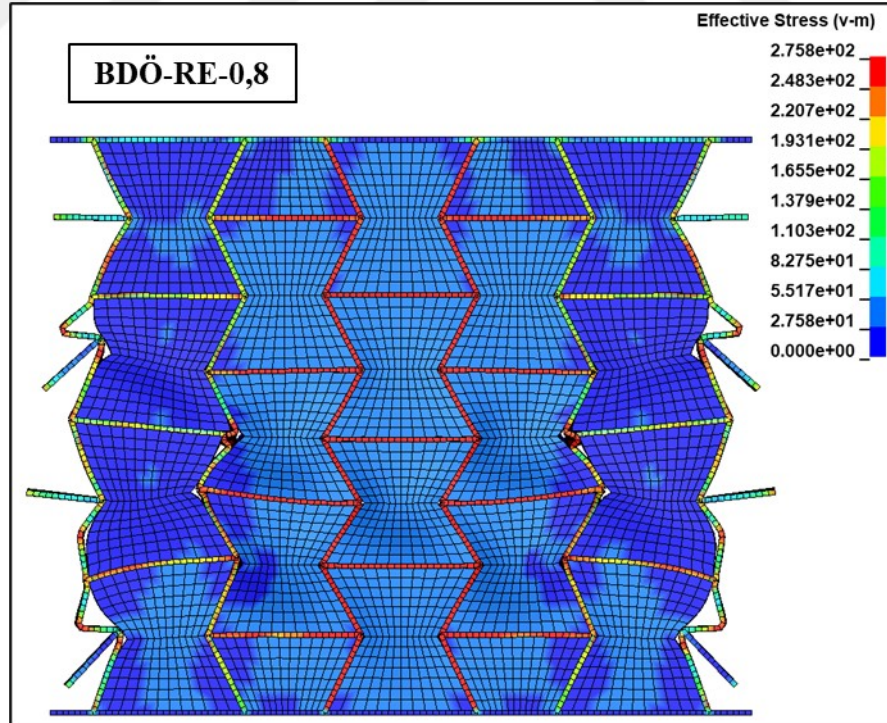
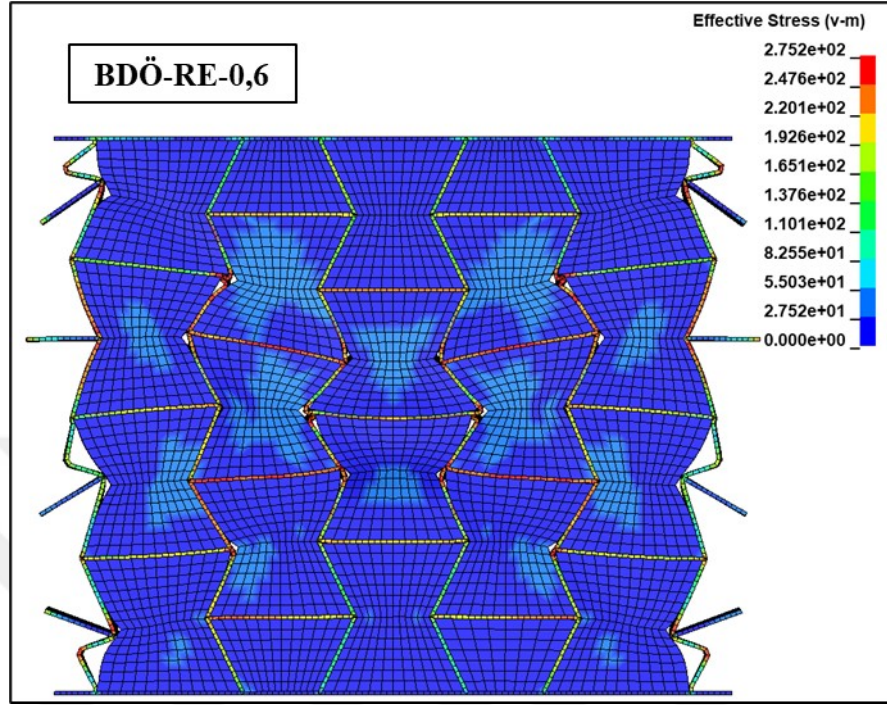
EK-2 (devam)



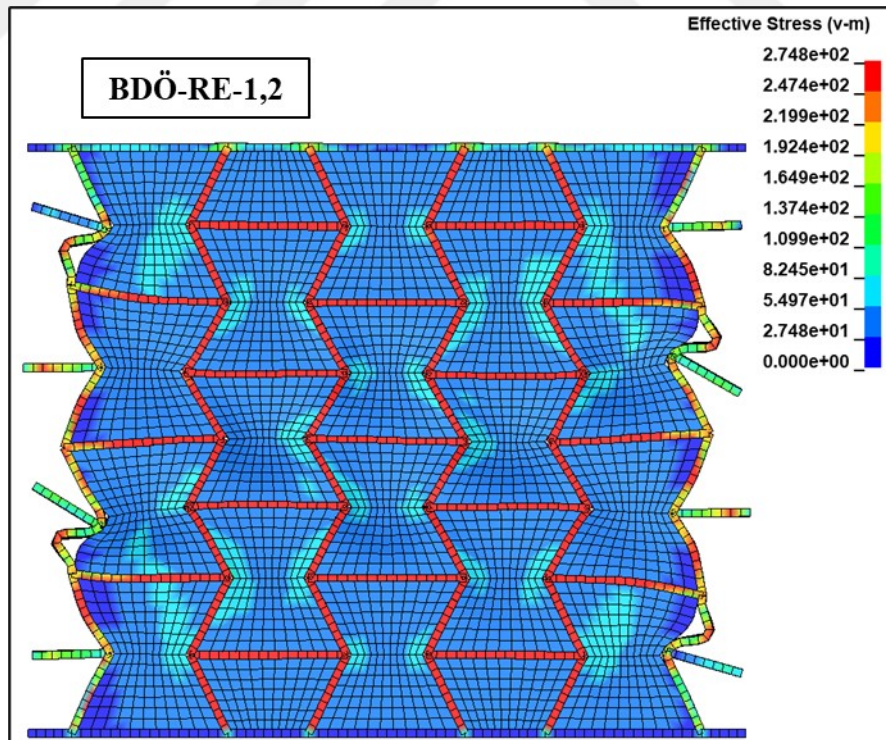
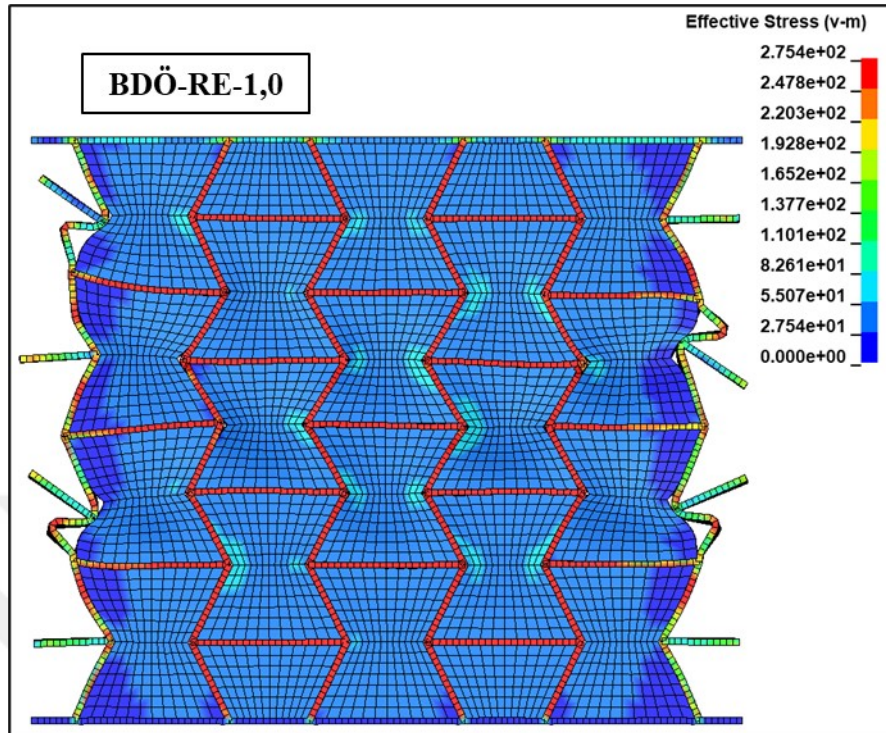
EK-2 (devam)



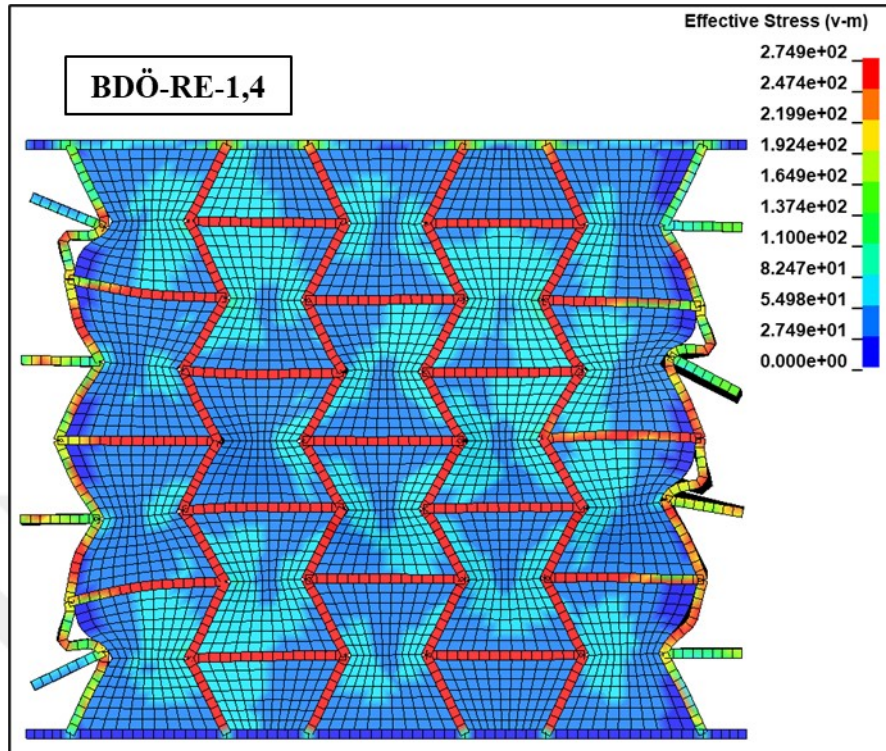
EK-3 Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.9’da verilen kompozit yapıların 10 mm basınç deplasmanı altındaki von Mises gerilme dağılımlarının görüntüsü



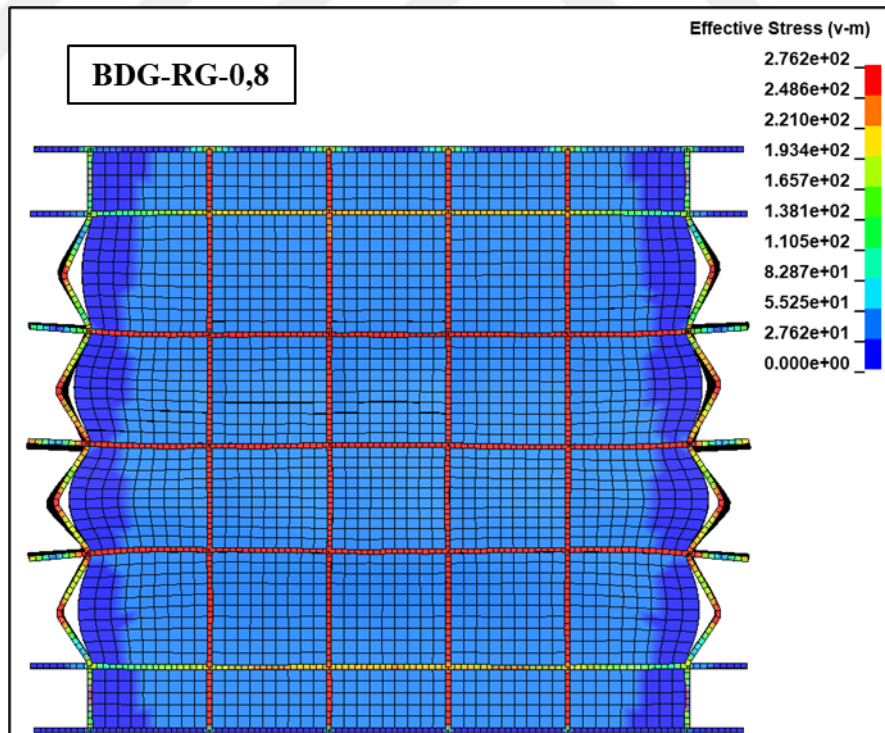
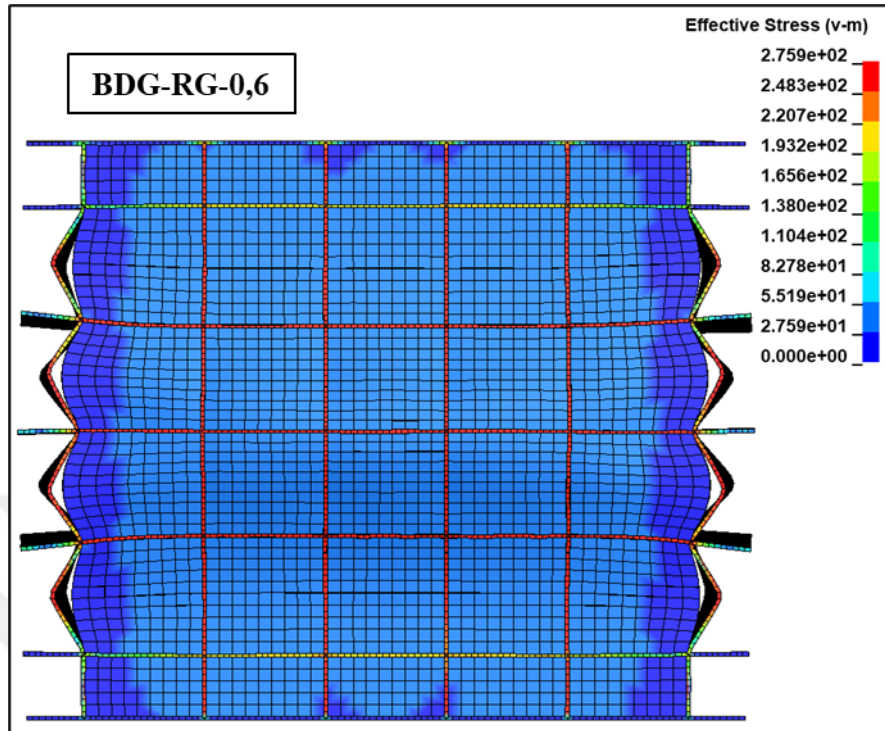
EK-3 (devam)



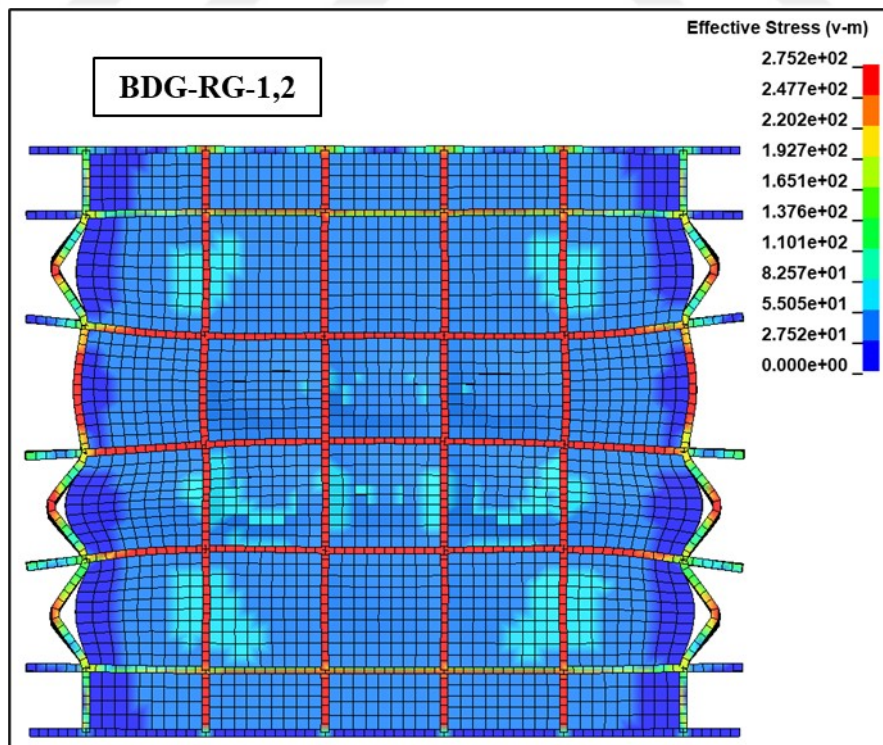
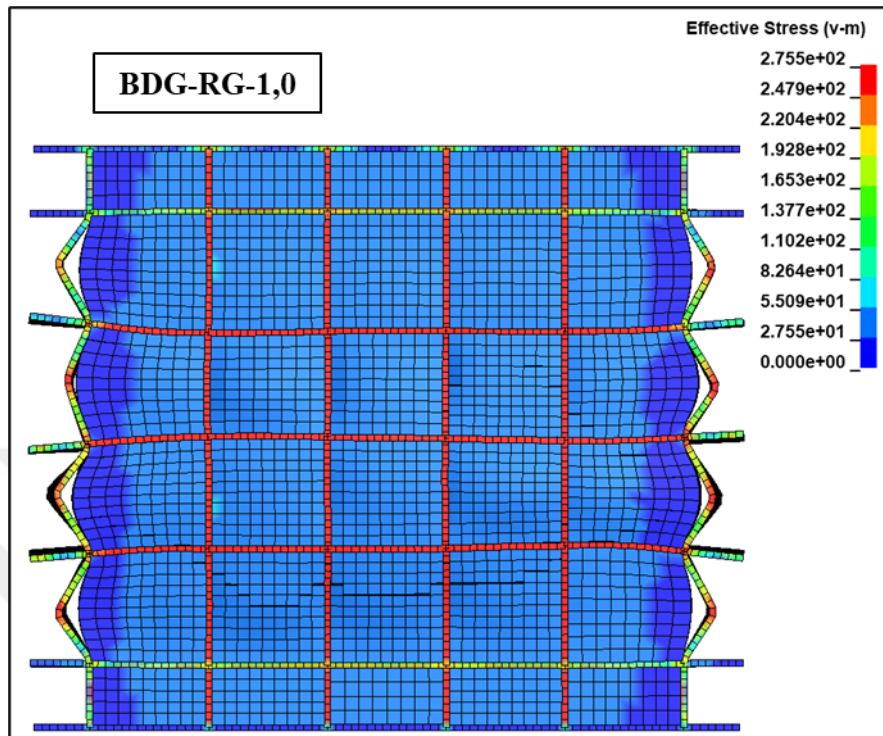
EK-3 (devam)



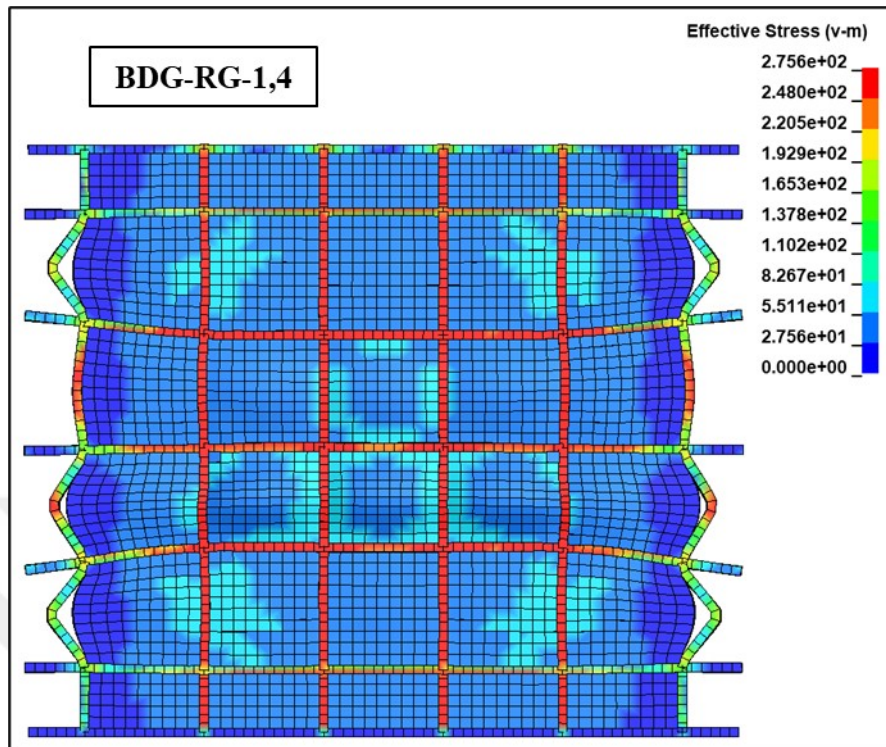
EK-3 (devam)



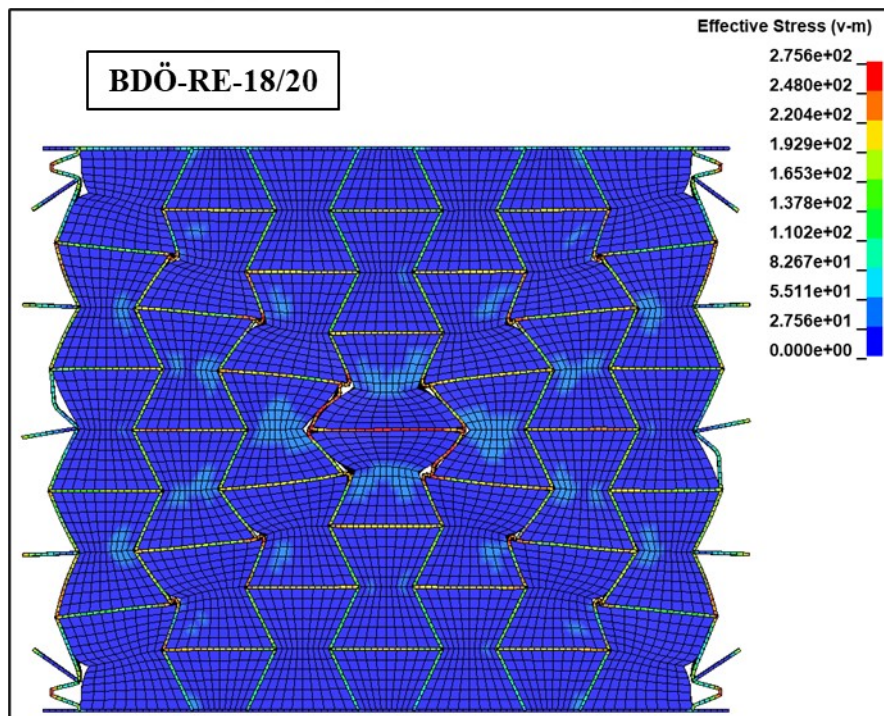
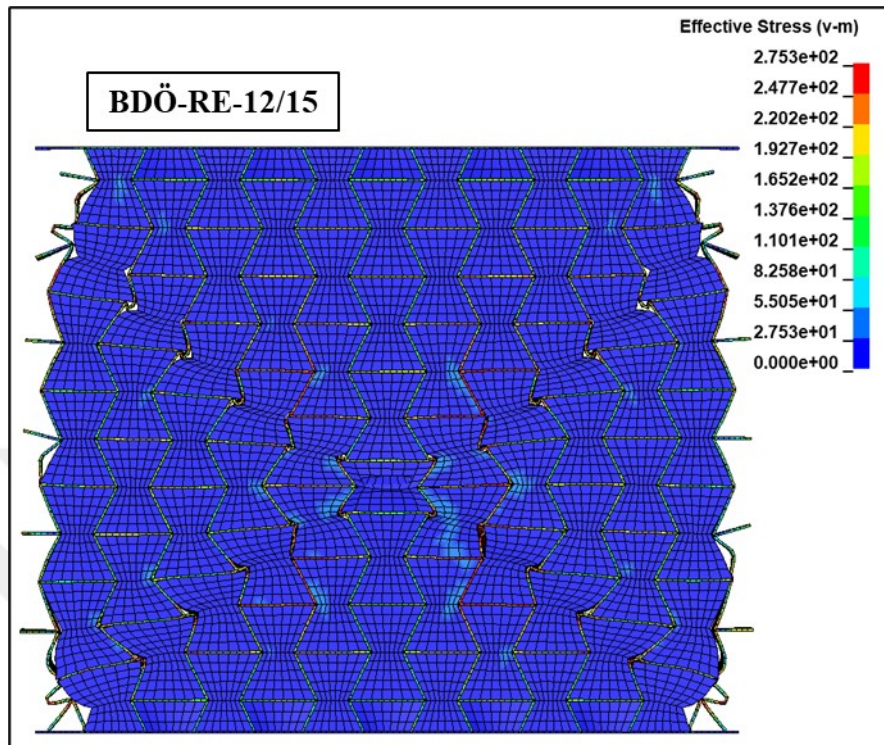
EK-3 (devam)



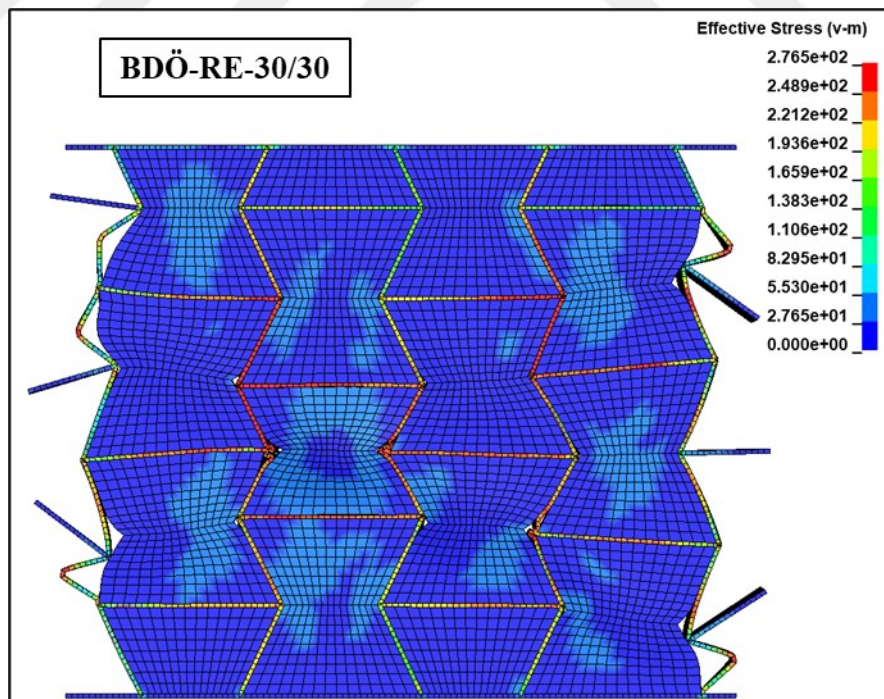
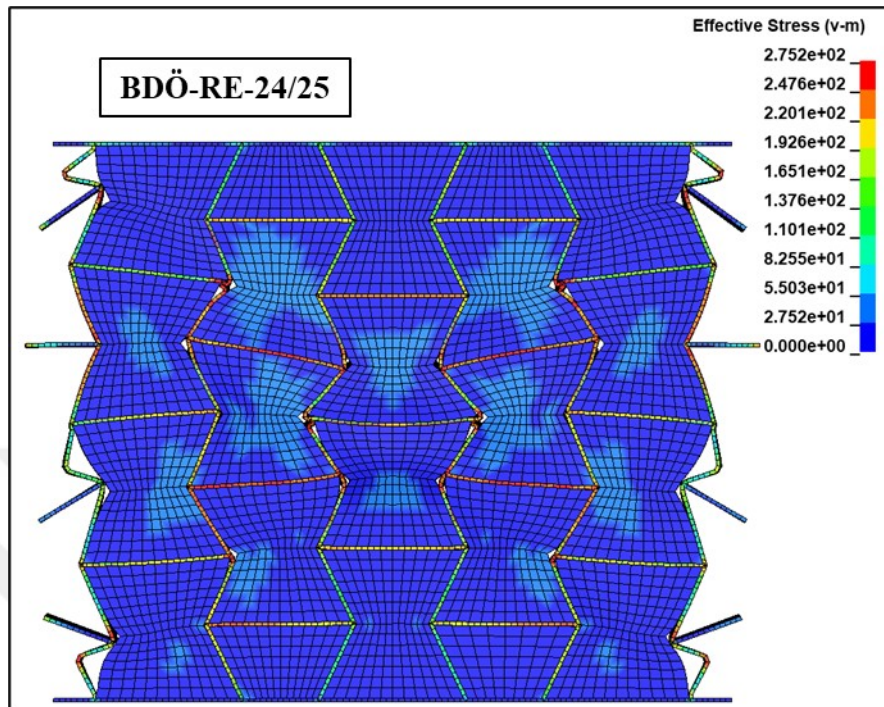
EK-3 (devam)



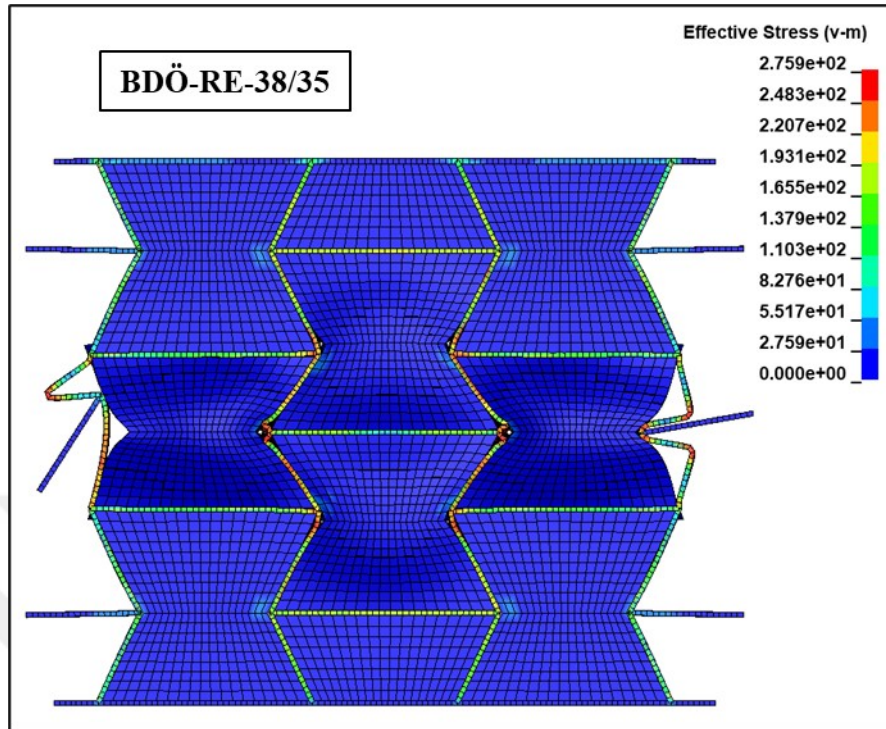
EK-3 (devam)



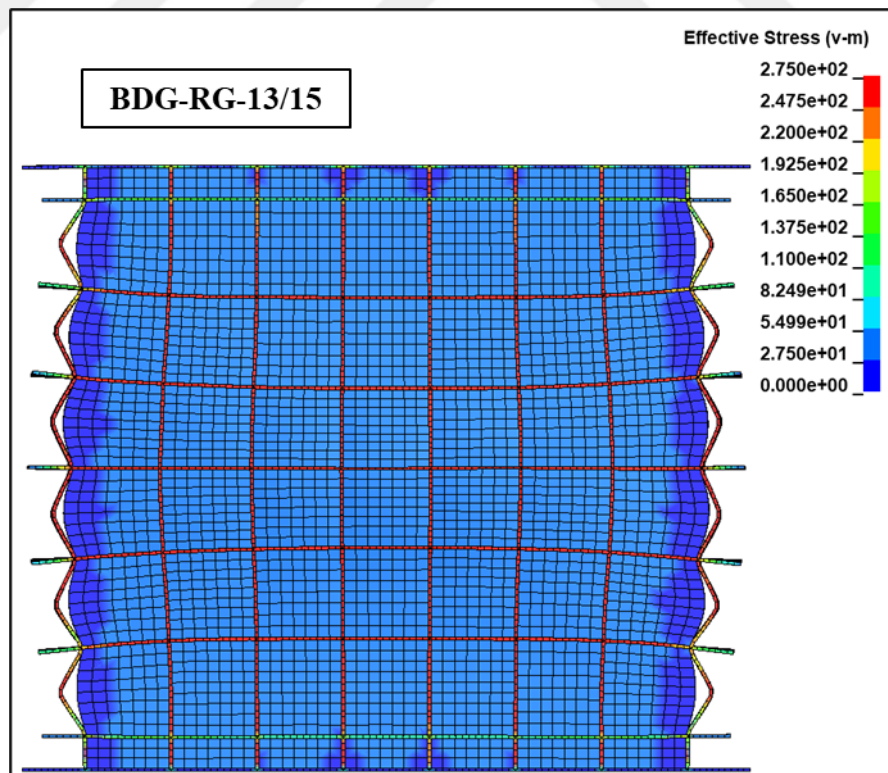
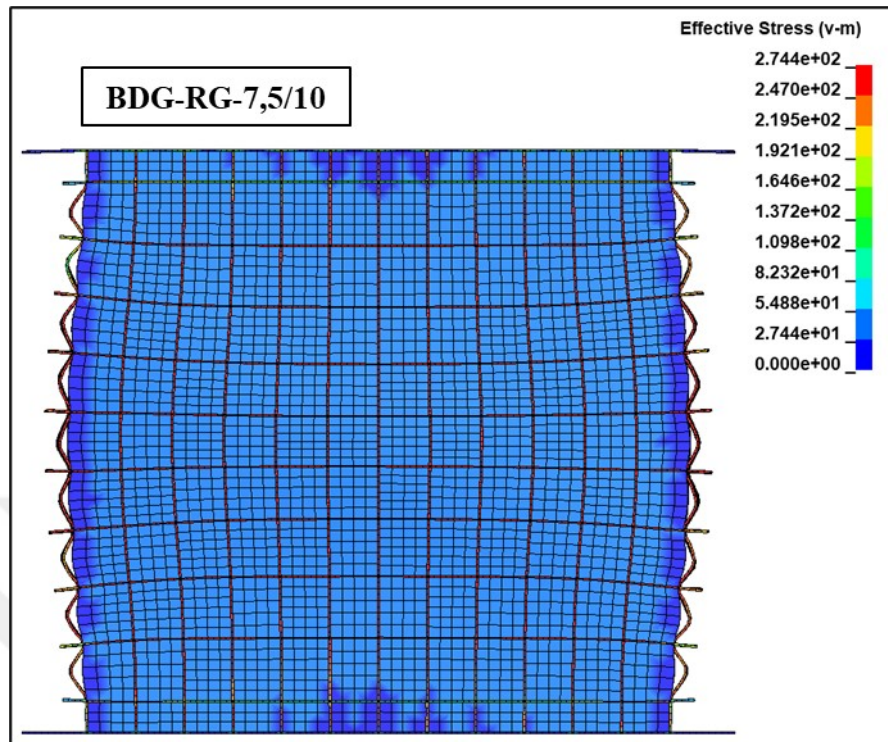
EK-3 (devam)



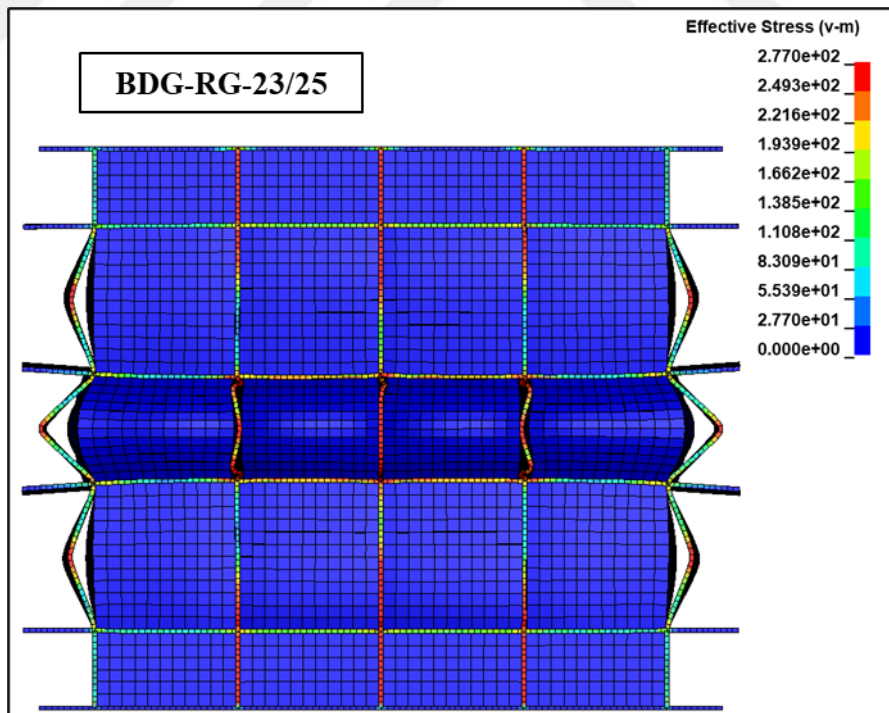
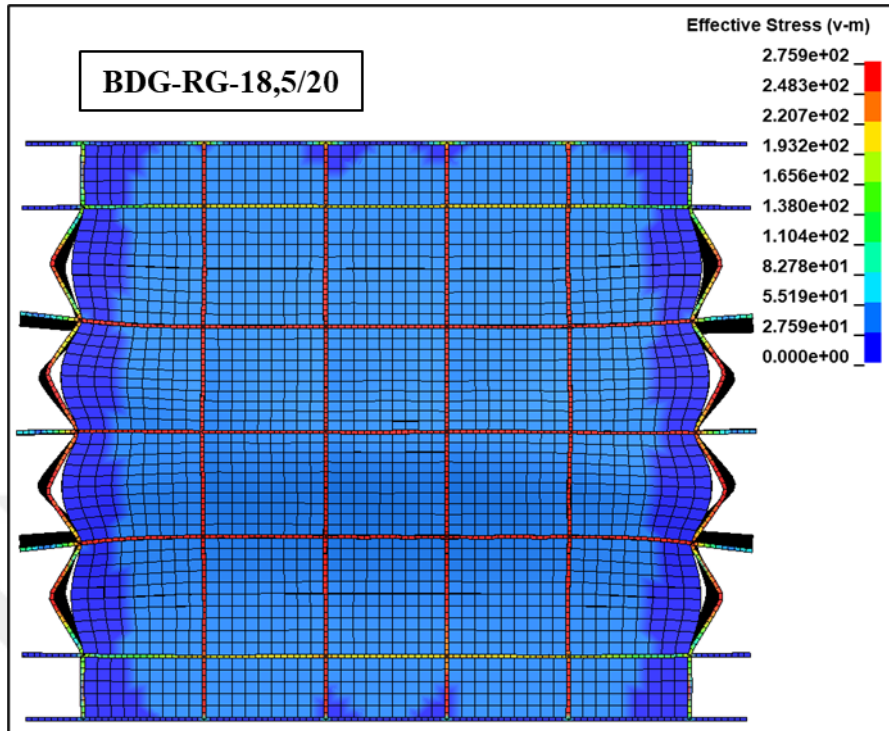
EK-3 (devam)



EK-3 (devam)



EK-3 (devam)



EK-3 (devam)

